le Scienze

Settembre 2019
euro 4,90

edizione italiana di Scientific American

Il big bang della vita

Nuovi fossili cominciano a rivelare come avvenne l'esplosione di diversità all'origine degli animali complessi

Neuroscienze
Il segreto degli animali che dormono con metà cervello

Bioinformatica
Usare il DNA come memoria per i big data

Ambiente
La Pianura Padana, maglia nera dell'inquinamento

in copertina

Sommario

L'evoluzione delle forme di vita complesse è iniziata nel periodo Ediacarano, cioè milioni di anni prima del Cambriano (*Illustrazione di Franz Anthony*)

settembre 2019 numero 613

10

17

91

SCIENZA NEWS

Cortesia di Cannon Photo (*in alto*); cortesia NASA (*al centro*); Food Collection/AGF (*in basso*)

di Marco Cattaneo

Editoriale

Il curioso caso della Federico II

Torniamo a parlare dei PRIN in matematica, e di un Dipartimento di successo

«La casa è il luogo da dove si parte e in cui si ritorna. Bentornato Luigi Di Maio». Così il 31 luglio Sandro Staiano, costituzionalista e direttore del Dipartimento di giurisprudenza dell'Università Federico II di Napoli, ha accolto il vice presidente del Consiglio. Il quale, pur avendo frequentato ingegneria e poi giurisprudenza, non ha mai agguantato il benedetto pezzo di carta.

Stupisce, forse, che un'accoglienza così calorosa sia riservata a uno studente mediocre. Non sorprende invece che alla Federico II parlino dell'ateneo come di una cosa di famiglia. Basta fare un giro al Dipartimento di matematica. Da qualche mese a questa parte lo dirige Cristina Trombetti. È figlia di Guido Trombetti. Avvocato? Macché, matematico. E che matematico. All'inizio degli anni ottanta era stato anche lui direttore, prima di diventare presidente del corso di laurea, preside della Facoltà di scienze e infine, dal 2001 al 2010, rettore. Dal 2013 al 2015 si è dedicato alla politica, come assessore all'Università e alla ricerca della giunta Caldoro e vice presidente del Consiglio Regionale. Poi è tornato a casa – pardon, all'Università – nel Dipartimento di fisica.

Il presidente del corso di laurea invece è Rocco Trombetti. Non fatevi ingannare dal cognome, pare che siano solo parenti di sesto grado. L'altro Trombetti, Marco, a quanto ne sappiamo potrebbe essere un caso di omonimia. Ma le famiglie non si esauriscono con il cognome. Vincenzo Ferone, per esempio, è anche lui nel Dipartimento, e nel Senato accademico. È il marito di Cristina Trombetti. Poi ci sarebbero altre famiglie, tra figli, cugini, nipoti, ma soprassediamo.

C'è da dire però che a Napoli in matematica non hanno rivali. Sui 23 PRIN assegnati – eccoli, i PRIN – l'analisi matematica ne ha avuti solo sei. E tutti e sei vantano, tra le sedi di progetto, l'Università di Napoli. L'unico specialista del settore nella commissione di valutazione era Carlo Sbordone, accademico dei Lincei e professore appunto di analisi matematica. Dove? Indovinato, a Napoli. Tra i vincitori di PRIN c'è poi un progetto di matematica per l'economia che ha per coordinatrice locale, a Napoli, Roberta Schiattarella, in un campo in cui all'apparenza non si è mai cimentata. Ricercatrice in analisi matematica, è segretaria della rivista «Rendiconti Lincei», diretta da Sbordone.

Tra i progetti finanziati c'è anche quello di Marco Sammartino, dell'Università di Palermo. Che si distingue per aver curato nel 2014 un numero speciale di «Acta Applicandae Mathematicae» sul quale ha pubblicato cinque articoli a sua firma. Cinque, come Tommaso Ruggeri, dell'Università di Bologna, sullo stesso numero. Un fatto, diciamo, piuttosto irrituale. E Ruggeri? Siciliano, accademico dei Lincei, era membro della commissione di valutazione dei PRIN.

Degli altri tre membri – Graziano Gentili, Valeria Ruggiero ed Elvezio Ronchetti – sappiamo poco, se non che hanno curricula meno sostanziosi di molti candidati bocciati. Né sappiamo quali siano i criteri con cui il Comitato nazionale dei garanti per la ricerca nomini i membri dei panel di valutazione e come sia selezionato lo stesso comitato. Un'opacità che ha destato critiche da gran parte della comunità scientifica.

Può anche darsi che vada tutto bene. Che questa situazione nelle Università sia la norma. Che dietro a scelte mediocri non ci sia un disegno preordinato. Però almeno smettiamo di lagnarci che i nostri giovani migliori, soprattutto al Sud, scappano all'estero.

A ottobre allegato a richiesta con «Le Scienze» *La Grande accelerazione*, un libro di John R. McNeill e Peter Engelke sull'Antropocene

L'impronta umana sulla Terra

L'umanità è entrata in un nuovo periodo della sua esistenza, un periodo in cui l'attività della nostra specie ha iniziato ad alterare i sistemi fondamentali della Terra lasciando importanti tracce di questa interferenza. Questo nuovo periodo ha già un nome: Antropocene; e gli scienziati sono da tempo al lavoro per definirne l'inizio in termini geologici.

La decisione definitiva non è stata ancora deliberata dall'Unione internazionale delle scienze geologiche (UISG), ma le tracce lasciate globalmente dai test delle bombe nucleari negli anni successivi alla seconda guerra mondiale, ormai parte della documentazione geologica in sedimenti e ghiacci, sembrano le favorite per delimitare l'inizio ufficiale dell'Antropocene.

Dopo la seconda guerra mondiale

L'idea di questo nuovo periodo dell'umanità è stata diffusa a partire dal 2000 dallo scienziato olandese Paul Jozef Crutzen, Nobel per la chimica nel 1995 per i suoi studi sul buco nell'ozono. Secondo Crutzen, l'influenza della specie umana sull'ecologia della Terra è cominciata con l'immissione in atmosfera di grandi quantità di anidride carbonica, in grado di aumentare la temperatura media del pianeta. In altre parole, il confine del nuovo periodo sarebbe da cercare a ridosso della Rivoluzione industriale tra la fine del XVIII secolo e gli inizi del XIX secolo.

Nei quasi vent'anni trascorsi dalla proposta di Crutzen, però, l'idea dell'Antropocene ha stimolato dibattiti e riflessioni. Non sulla sua realtà, ormai indiscutibile per la comunità scientifica come per l'opinione pubblica mondiale. Ma sulla sua data di nascita, come suggerisce la decisione ancora non presa dall'UISG, e in parte anche sul suo sviluppo storico, come raccontano John R. McNeill, storico dell'ambiente, e Peter Engelke, storico e analista di questioni globali, in *La Grande accelerazione. Una storia ambientale dell'Antropocene dopo il 1945*, libro allegato a richiesta con «Le Scienze» di ottobre.

Per gli autori, il nuovo periodo dell'umanità inizia alla fine della seconda guerra mondiale. Certo, le basi sono state gettate ben prima, come ripercorrono brevemente McNeill ed Engelke nel volume, ma è solo negli anni successivi al conflitto che siamo in entrati in quella che chiamano «La Grande accelerazione».

Impatto indelebile

A partire dalla seconda metà del XX secolo, le attività umane sono diventate il fattore più importante alla base dei cicli del carbonio, dello zolfo e dell'azoto, ovvero dei componenti principali di quello che oggi chiamiamo «sistema Terra». Inoltre, sempre dalla metà del secolo scorso, l'impatto delle attività antropiche sul pianeta e sulla biosfera è aumentato vertiginosamente. Crescita demografica, espansione delle città, sviluppo di sistemi economici e tecnologici basati sullo sfruttamento delle risorse naturali come se fossero infinite, consolidamento di un sistema energetico basato combustibili fossili e nascita di una cultura ambientale sono tutti tratti caratteristici della Grande accelerazione successiva alla seconda guerra mondiale e che da allora coincide con la nascita dell'Antropocene. Sarà così fino alla fine dei nostri giorni come specie?

Secondo gli autori già assistiamo a un rallentamento dell'accelerazione appena descritta, ma è difficile capire che cosa ci riserva il futuro. Una cosa è certa però. Se anche la Grande accelerazione dovesse arrestarsi, l'Antropocene ormai è indelebile e lo sarà ancora per un tempo lunghissimo.

Intervista

Marc Abrahams, l'ideatore dei premi IgNobel per le ricerche in apparenza più assurde, riflette sul rapporto tra scienza e società

Comunicare la scienza deridendola

Negli anni recenti si è assistito a un aumento di posizioni «anti-scientifiche»: ci si oppone alle vaccinazioni, si organizzano convegni sul «terrapiattismo», si avversano le teorie sui cambiamenti climatici e ci si oppone agli OGM. Senza dimenticare chi rigetta la teoria evoluzionistica o ritiene lo sbarco sulla Luna una messinscena hollywoodiana. A queste ipotesi si contrappongono numerose iniziative che mirano a «tutelare la scienza». Abbiamo chiesto a Marc Abrahams, ideatore dei premi IgNobel – uno spettacolo che annualmente premia le ricerche apparentemente più assurde – qual è lo stato dei rapporti tra scienza e società.

Andiamo dritti al punto: ritiene che la scienza sia sotto attacco?

Non credo che l'espressione «guerra alla scienza», usata da illustri commentatori, descriva appieno la situazione reale. Non si tratta di un attacco rivolto alla scienza in sé. In generale, si possono osservare alcuni gruppi, sostenitori di una teoria o di un'idea, che fanno di tutto per screditare chi la pensa diversamente. La scienza rientra molto spesso in questi dibattiti perché uno dei suoi scopi è individuare il confine tra quello che è vero e quello che non lo è. In ogni caso non penso che sia in corso una guerra alla scienza. È solo una guerra contro chiunque usi la scienza per dimostrare l'inconsistenza di certe idee.

Scienziati e ricercatori che decidono di impegnarsi nella sfera pubblica per rispondere a queste sollecitazioni sociali spesso assumono un atteggiamento paternalistico.

Credo che questo possa considerarsi quasi una tradizione presente ovunque nel mondo. Intendiamoci però, l'atteggiamento paternalistico non viene adottato solo nei confronti del pubblico generalista. Per uno scienziato è considerato sconveniente spiegare qualcosa in maniera semplice sia quando si rivolge a un non addetto ai lavori sia quando sta parlando con i colleghi che si occupano di un'altra disciplina.

È una tendenza taciuta ma ben conosciuta da gran parte degli scienziati, inclusi quelli più famosi. Di solito si parla sempre e solo di questa netta divisione tra chi è scienziato e chi non lo è, ma, così facendo, non si ha il quadro completo. Lasciate che vi descriva in breve l'intera storia della scienza.

Prego…

A scuola ci viene sempre insegnato che la storia è costellata da scoperte grandiose. In sostanza, un qualche genio, a un certo punto, scopre qualcosa, tutti riconoscono immediatamente il valore del suo lavoro, il mondo cambia in meglio e si festeggia allegramente. Invece sappiamo che le cose non vanno proprio così.

Cortesia di Mike Benveniste/Improbable Research

Quando qualcuno propone qualcosa di insolito o scopre qualcosa di nuovo, in genere, viene sminuito e deriso. È una reazione comune e si manifesta anche nella comunità scientifica. Quando ci si interessa a qualcosa che è al di fuori dell'esperienza delle altre persone, queste, in genere, reagiscono ridicolizzando oppure offendendo quello che ancora non capiscono. Solo nel momento in cui si è abbastanza bravi da comunicare loro il valore di quello che si sta facendo, allora tutto cambia e quello che prima era considerato «sciocco» diventa «importante». Ecco, questo è più o meno il meccanismo alla base dell'intera storia della scienza.

È questo il motivo che ha portato alla nascita dei premi IgNobel? La necessità di comunicare il valore della ricerca scientifica «di confine»?

All'inizio, quando avevo da poco iniziato a lavorare per il «Journal of Improbable Research», mi ero messo in testa di organizzare qualche tipo di evento per far conoscere la rivista. Via via che incontravo scienziati e inventori che stavano lavorando su ricerche o su oggetti insoliti, non ho potuto fare a meno di notare che si trattava di persone quasi del tutto sconosciute.

Non riuscivo a smettere di pensare al fatto che la gran parte di loro sarebbe morta, un giorno, e che nessuno avrebbe mai conosciuto e apprezzato il loro lavoro, le loro idee e le loro intuizioni. Ho pensato che tutto ciò fosse profondamente sbagliato e che bi-

di Gianluca Liva e Andrea Rubin

CHI È

MARC ABRAHAMS

Nasce nel 1956. Dopo avere conseguito la laurea in matematica applicata alla Harvard Business School, inizia a lavorare nel campo dell'informatica.
Dal 1990 al 1994 è redattore del «Journal of Irreproducible Results» e nel 1991 inaugura la prima edizione dei famigerati premi IgNobel.
Nel 1994, dopo la chiusura della rivista da parte dell'editore, è cofondatore degli «Annals of Improbable Research», la rivista che da allora si fa carico di organizzare gli IgNobel.
È autore di libri, speaker radiofonico, curatore del sito web Improbable Research e presentatore della cerimonia annuale in cui vengono assegnati i premi.

La cerimonia per l'assegnazione dei premi IgNobel si svolge al Sanders Theater della Harvard University, negli Stati Uniti.

sognava rimediare. Lo scopo, in senso più ampio, era, ed è ancora oggi, stimolare la curiosità verso il mondo scientifico e verso il mondo in generale.

Visto il particolare periodo storico che la scienza sta attraversando, non crede che gli IgNobel rischino di rivelarsi pericolosi per la scienza?

Sì, penso che gli IgNobel siano pericolosi perché obbligano le persone a pensare e a rivalutare l'idea che si sono fatte del ruolo degli scienziati. Se chiedi a un non addetto ai lavori che cosa sono gli scienziati, ti risponderà che gli scienziati sono i custodi della verità. Quando, invece, si parla con uno scienziato, scopri che la gran parte di quello che fa è porsi domande. Gli scienziati, in realtà, sono persone che tentano di capire quali siano le domande giuste che dobbiamo porci, quelle veramente importanti per noi. È fin troppo comune pensare agli scienziati come divinità sempre impegnate a fare grandi proclami al popolo della cima di una collina. La realtà è completamente diversa.

I premi IgNobel sono internazionali. Nella sua esperienza pluridecennale ha notato differenze culturali nell'accettare la sua ironia tra i ricercatori dei diversi paesi?

Sì e no. A forza di viaggiare in giro per il mondo ho capito che il senso dell'umorismo delle persone è molto simile. Il modo di reagire all'ironia e allo spirito degli IgNobel è comune e travalica i confini geografici. D'altra parte, però, ci sono persone provenienti da particolari paesi che hanno quasi sempre declinato l'offerta del premio. Si tratta di paesi in cui vige un «codice d'onore». In queste culture, la peggior cosa che possa succedere a un individuo è essere deriso in pubblico. Mi è capitato di osservare questo pudore, questo imbarazzo, non solo con i premi IgNobel ma anche quando tentavo di intervistare qualche autore di una ricerca particolarmente interessante dal nostro punto di vista. Anche se lo stesso autore trovava «buffa» la propria ricerca, riteneva inaccettabile che venisse presentata al pubblico in maniera scherzosa. Sembra quasi un paradosso!

Un'ultima domanda: ha idea di innovare i premi IgNobel?

Ci penso sempre e vorrei trovare qualche strategia per raggiungere un pubblico più vasto ma rischierei di snaturare il premio. Ci sono tantissime realtà che raccontano storie simili a quelle degli IgNobel enfatizzandone esclusivamente l'apparente stupidità. Ecco, noi ci impegniamo ogni giorno per non dare questa idea. E il motivo è duplice: anzitutto, sono convinto che la grande maggioranza delle persone non sia stupida. In secondo luogo, le cose che fanno le persone non devono essere considerate stupide, anche quando, in apparenza, possono sembrarlo.

Cortesia di Cannon Photo (*cerimonia IgNobel*);
cortesia Davidlkessler/Wikimedia Commons, CC BY-SA 4.0 (*Abrahams*)

Theras Group sviluppa tecnologie innovative per il monitoraggio e il trattamento del diabete e la gestione del dolore cronico

Una vita migliore per diabetici e pazienti con dolore cronico

Fiuto per gli affari e amore per la ricerca medica intesa come strumento per far vivere meglio le persone, quindi facile da usare. Su questi due binari si muove il treno di Theras Group, azienda nata e cresciuta a Salsomaggiore Terme, in provincia di Parma, leader nella ricerca e nella messa in commercio di tecnologie per il monitoraggio e il trattamento del diabete e la gestione del dolore cronico. «Ho lavorato con soddisfazione in realtà avanzate dal punto di vista tecnologico e culturale ma ho sempre avuto il pallino della sostenibilità e a un certo punto ho voluto seguire la mia passione», racconta il presidente Cristiano Ferrari, una vita passata in mezzo ai dispositivi medici lavorando per grandi aziende.

Sostenibilità vuol dire costo contenuto della tecnologia ma anche facilità di uso per i pazienti. Nel caso del diabete, per esempio, questo ultimo aspetto è fondamentale: gli esperti calcolano che sono circa 20.000 le punture al dito alle quali un diabetico si sottopone in dieci anni e che, proprio a causa della difficoltà a mantenere questo impegno, solo un paziente su tre si controlla costantemente per decidere quando e se intervenire con la terapia corretta. Come fare per aiutare i diabetici a mantenere sotto controllo la malattia e avere una buona qualità di vita? «Quando sono uscito dall'ultima grande aziende dove ho lavorato, dopo qualche anno in cui mi sono riposato e dedicato a progetti di breve termine, ho incontrato un vecchio amico che mi ha raccontato il suo progetto e ho capito che si trattava di una vera rivoluzione in questo campo», va avanti Ferrari. Ecco il fiuto di chi, sulla base delle competenze, è capace di riconoscere un potenziale dove gli altri vedono solo un'idea.

Da importatori a sviluppatori

La novità principale degli ultimi anni nel campo del diabete è stata senza dubbio l'introduzione sul mercato dei microinfusori, e l'azienda di Salsomaggiore è stata scelta da un'importante società statunitense come proprio ambasciatore in Italia per la messa in commercio di uno strumento piccolo, comodo, impermeabile come un *patch*, un cerotto che contiene 200 unità di insulina, e ne rilascia la giusta quantità quando serve. «Vogliamo offrire soluzioni scientificamente innovative e tecnologicamente evolute che vadano però incontro ai bisogni dei più giovani in cerca di una maggiore autonomia con attenzione anche nell'estetica e vestibilità dello strumento», spiega il manager. A questo si aggiunge un sistema di monitoraggio dei livelli di glicemia di ultima generazione che segnala con 20 minuti di anticipo il pericolo di ipoglicemie, cioè che i livelli di zuccheri nel sangue scendano troppo velocemente.

AzmanJaka/iStock

La combinazione delle due innovazioni permette di avere una vita il più possibile simile a chi non soffre della malattia. «Vuole sapere che differenza fa per i pazienti? Io l'ho capito quando un bambino che usava i nostri dispositivi mi ha detto che finalmente, al ritorno da scuola, sua madre gli chiedeva come era andata in classe, non come si fosse mantenuto il livello della glicemia», racconta Ferrari.

La storia di Theras e delle innovazioni «fiutate» da Ferrari come potenzialmente capaci di cambiare la vita dei pazienti inizia però con la terapia del dolore, nel 2011, quando il manager scommette sulla neurostimolazione: un italiano su quattro soffre di dolore cronico, e di questi il 25 per cento non è adeguatamente trattato. L'idea per trovare una soluzione è fuori dagli schemi: non usare farmaci, terapie consolidate e usate da decenni, ma ridurre i segnali di dolore al cervello con gli impulsi elettrici.

La neurostimolazione può essere più o meno invasiva: si va dalla neurostimolazione percutanea, in grado di alleviare il dolore già dalla prima applicazione nella zona di interesse, alla stimolazione del midollo spinale, in cui si impianta un piccolo dispositivo che rilascia in sicurezza lievi impulsi elettrici ai nervi interrompendo o riducendo la trasmissione dei segnali del dolore al cervello. In

di Letizia Gabaglio

Il gruppo di lavoro di Theras; accanto un sistema per la microinfusione di insulina sviluppato dall'azienda. A fronte, una misurazione dei livelli di glucosio nel sangue tramite una puntura su un dito.

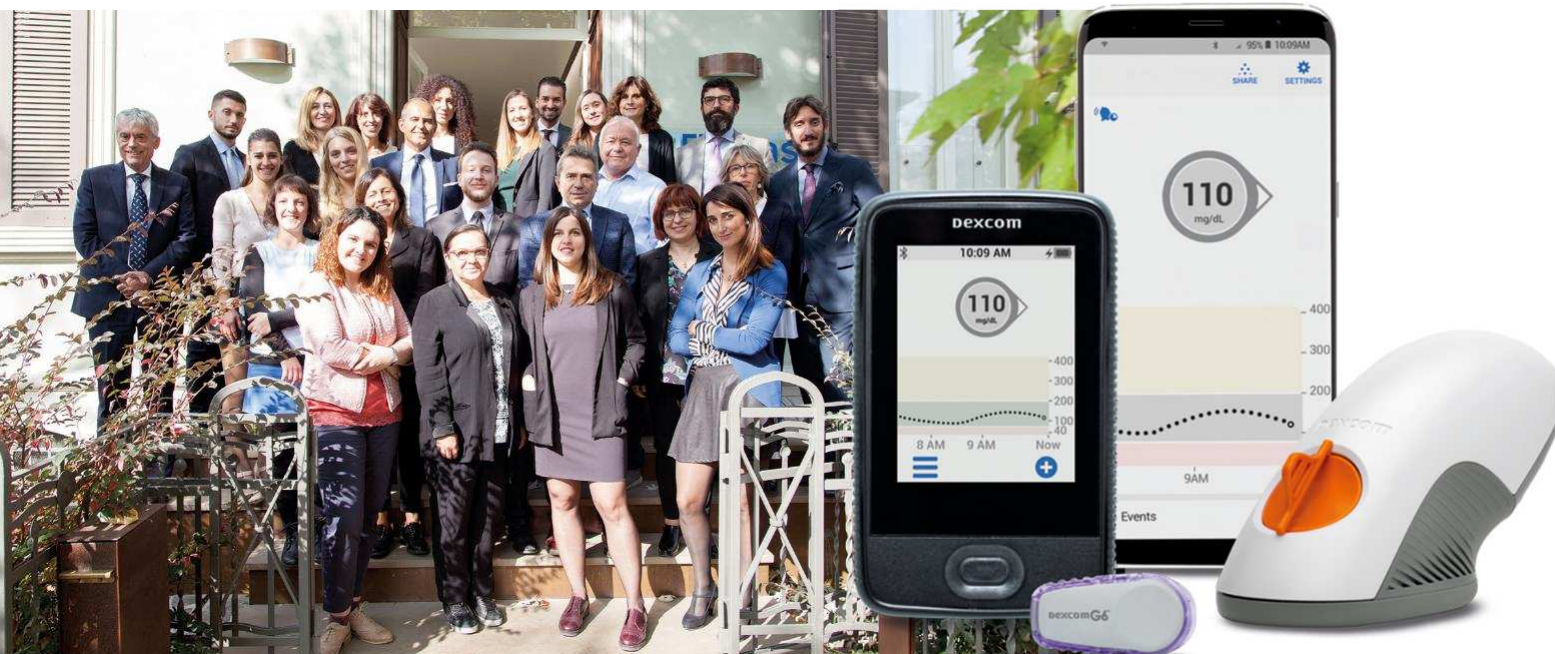
LA SCHEDA - THERAS GROUP

Azienda fondata nel 2012

Persone di riferimento: Cristiano Ferrari (presidente)

Sito: https://www.theras-group.com **Mail:** Lifetch@theras-group.com

Numero di brevetti: n.d.

Dipendenti-collaboratori: 75

entrambi i casi l'azienda ha una soluzione: nel primo caso si tratta di un sistema ideato dalla ricerca effettuata in Theras; nel secondo, l'azienda distribuisce in Italia un dispositivo che ha dimostrato di riuscire a gestire il dolore soprattutto alla schiena e alle gambe più di quanto riesce a fare la stimolazione tradizionale. I prodotti di Theras sono in parte sviluppati in casa in parte no.

«All'inizio abbiamo portato in Italia dispositivi sviluppati da altri, ma dopo pochi anni abbiamo iniziato a stringere accordi con università e centri di ricerca per sviluppare idee nostre. Sempre all'insegna di innovazione e sostenibilità», sottolinea Ferrari.

Gli altri progetti

Come il prossimo dispositivo targato Theras, che entrerà in commercio a fine 2019, pensato per ridurre il più possibile il fastidio delle migliaia di iniezioni di insulina che sono costrette a farsi le persone sprovviste di microinfusori. È una soluzione molto economica ma confortevole, pensata come un *port* (di fatto un catetere) di plastica che permette di inserire l'ago al suo interno in modo che il paziente si debba pungere solo una volta ogni tre giorni riducendo il numero delle punture da 30 a una.

Il futuro d'altronde sarà contrassegnato da prodotti sempre più economici: oggi i sensori per il monitoraggio sono piuttosto costosi, ma nel giro di pochi anni il processo di miniaturizzazione porterà ad abbattere i prezzi, che saranno paragonabili a quelli dei dispositivi tradizionali che quindi scompariranno via via.

In questo momento sono otto i progetti di ricerca in cui è impegnata l'azienda. Il più ambizioso è portato avanti con il Consiglio nazionale delle ricerche a Parma e l'Università di Parma in collaborazione con il Politecnico di Torino e l'Università di Milano-Bicocca per lo sviluppo di un dispositivo nanotecnologico per il rilascio di analgesici. L'obiettivo è sempre la qualità di vita dei pazienti, insieme all'efficacia: per evitare effetti collaterali legati alla somministrazione per via sistemica dei medicinali contro il dolore post-operatorio, i ricercatori stanno mettendo a punto un altro cerotto con migliaia di microcamere che contengono il farmaco da applicare sulla zona dove si sviluppa il dolore.

«La fine del progetto è prevista per il 2021, a quel punto se tutto andrà come previsto dovremmo cercare una grande azienda farmaceutica capace di portare il prodotto sul mercato», conclude Ferrari. Theras quindi sarà pronta per un altro progetto su cui scommettere seguendo il «fiuto» del suo presidente e il suo «pallino» di sviluppare tecnologie semplici da usare per i pazienti.

Theras Group (*tutte le foto in questa pagina, 2*)

di Piergiorgio Odifreddi

professore ordinario di logica matematica all'Università di Torino
e *visiting professor* alla Cornell University di Ithaca (New York)

La nascita dell'irrazionale

Una breve storia della scoperta delle grandezze incommensurabili

La diagonale e il lato del quadrato sono grandezze incommensurabili, nel senso che non esiste nessuna unità di misura che stia un numero intero di volte in entrambe: qualunque unità che misuri esattamente la diagonale non misura esattamente il lato, e viceversa. Storicamente, la scoperta di questo «principio di indeterminazione» è attribuita a Pitagora, mentre la colpa di averla divulgata è imputata a Ippaso di Metaponto.

La principale fonte al riguardo è *La vita di Pitagora* di Giamblico, che narra: «Qualcuno dice che il primo che rivelò la natura della commensurabilità e dell'incommensurabilità a gente indegna di conoscerla suscitò un tale odio tra gli altri Pitagorici, che essi non solo lo cacciarono dalla comunità, ma gli costruirono anche un sepolcro, come se fosse già morto. Altri dicono che persino gli dèi si erano adirati, e fecero annegare per la sua empietà Ippaso, che aveva rivelato che il dodecaedro è inscrivibile in una sfera».

La leggenda della segretezza

In questa citazione c'è molta confusione, che proviamo a dissipare. Anzitutto, è una leggenda il fatto che i Pitagorici avessero un vincolo di segretezza che li impegnava a non divulgare le proprie dottrine. Di questo vincolo non si parla affatto nelle fonti più antiche, e sembra che la leggenda sia sorta proprio per un equivoco a proposito della scoperta dell'incommensurabilità.

L'aggettivo *logon* che i Greci usavano per indicare la commensurabilità derivava dall'ambiguo sostantivo *logos*, che aveva due significati principali. Il primo era «parola», e il secondo «rapporto»: un termine, questo, che in latino fu tradotto con *ratio*, e in italiano con «ragione».

Il credo originario dei Pitagorici era che tutto fosse commensurabile: cioè, matematicamente rapportabile e linguisticamente esprimibile. La scoperta di grandezze incommensurabili non solo falsificò questo credo, ma mostrò l'esistenza di grandezze che potevano essere chiamate «irrazionali» o «indicibili». Ma questa indicibilità finì per essere intesa come una proibizione della divulgazione di quella particolare scoperta, e poi dell'intero insegnamento pitagorico. Ovvero, un «non si può dire» divenne un «non se ne deve parlare».

Il collegamento con il dodecaedro

Fatta dunque la tara al racconto di Giamblico, rimane il fatto che egli collegava Ippaso alla scoperta di grandezze incommensurabili, citando però non la diagonale e il lato del quadrato, ma il dodecaedro inscritto in una sfera. Questo lascia intendere che siano stati appunto i Pitagorici, e forse Ippaso stesso, a scoprire che esistevano altri due solidi regolari (dodecaedro e icosaedro), oltre ai tre più semplici già noti (tetraedro, cubo e ottaedro).

Ora, il collegamento del dodecaedro con gli irrazionali sta nel fatto che le sue facce sono pentagonali, e che la diagonale e il lato del pentagono sono incommensurabili. La dimostrazione geometrica è visualizzabile tracciando le diagonali del pentagono, che formano una cosiddetta «stella pitagorica» (appunto), con un nuovo pentagono al centro: si innesca così un regresso all'infinito, in cui pentagoni e stelle si alternano telescopicamente.

Ancora più semplice è la dimostrazione dell'incommensurabilità dei lati lungo e corto di un rettangolo aureo, che hanno la stessa proporzione della diagonale e del lato del pentagono: cioè, la famosa proporzione aurea, scoperta anch'essa dai Pitagorici. Probabilmente essi si imbatterono nell'incommensurabilità prima nel rettangolo aureo, e poi nel pentagono. E solo in seguito qualcuno scoprì poi lo stesso fenomeno nel quadrato, la cui dimostrazione geometrica è molto meno perspicua, trovando la dimostrazione numerica per assurdo dell'irrazionalità della radice di due riportata da Aristotele negli *Analitici primi*.

di Elena Castellani

professore associato, Dipartimento di filosofia,
Università di Firenze

L’utilità degli esperimenti analoghi

Che tipo di conferme si ottengono sperimentando su modelli analoghi?

Una questione che ultimamente suscita molto interesse riguarda la confidenza che si può avere nei risultati che si ottengono attraverso i cosiddetti esperimenti analoghi. Si tratta di un modo non convenzionale di fare esperimenti, che usa due nozioni chiave della metodologia scientifica: rispettivamente, quelle di modello e di analogia. L’uso di modelli (matematici, concreti, fenomenologici, fittizi e così via) e di forme di ragionamento per analogia non è una novità nella scienza. Ma il modo in cui queste nozioni sono usate negli esperimenti analoghi è diverso da quello convenzionale.

Esperimenti non convenzionali

Di norma, nel ragionamento per analogia si traggono inferenze su un dato sistema a partire dalle inferenze compiute su un altro sistema, analogo al primo per le caratteristiche rilevanti rispetto al problema studiato (costituendone così un modello analogo). È un ragionamento particolarmente appropriato dal punto di vista euristico, cioè per ottenere nuove scoperte: sulla base di relazioni di somiglianza tra diversi ambiti, fenomeni o oggetti, si fanno inferenze da ciò che è noto a ciò che non è ancora noto.

Nel caso degli esperimenti analoghi, invece, si ha che fare con l’ambito della giustificazione o conferma delle teorie, piuttosto che della scoperta: si usano modelli analoghi per esperimenti che permettano di ottenere conferme sperimentali in quei casi in cui queste siano molto difficili o addirittura impossibili da raggiungere, almeno allo stato attuale delle conoscenze teoriche e delle capacità tecnologiche. I modelli analoghi non sono cioè usati per inferenze teoriche, ma per essere sottoposti a un esperimento in laboratorio, in modo da poter poi trasferire la conferma empirica ottenuta per il sistema che funge da modello al sistema che si vorrebbe sottoporre a osservazione. In altre parole, quello che è peculiare, nell’uso di modelli analoghi in questo tipo di esperimenti non convenzionali, è il lato operativo, cioè il fatto di compiere concretamente un esperimento che però non riguarda il sistema studiato ma un altro sistema, che rispetto al primo assume la funzione di modello.

L’esempio dei buchi neri

È chiaro che esperimenti simili sono interessanti soprattutto nel caso di ricerche in cui, per vari motivi, la conferma empirica è inaccessibile: tra gli esempi più significativi, teorie o modelli che cercano di descrivere quello che succede a energie come quelle che caratterizzano i primi istanti dell’universo, o la fisica dei buchi neri, entrambi casi di interesse per le ricerche di gravità quantistica (una teoria che metta insieme relatività generale e meccanica quantistica). Proprio in relazione ai buchi neri, un esperimento analogo che ha fatto discutere è stato quello realizzato in Israele nel 2016 dal fisico Jeff Steinhauer su un analogo acustico di un buco nero. In base alla possibilità di stabilire un’analogia tra buchi neri reali, che intrappolano la luce, e «buchi neri acustici», che intrappolano il suono – un’idea formulata dal fisico Bill Unruh negli anni settanta – Steinhauer è riuscito a osservare, nel suo laboratorio, l’analogo acustico della «radiazione di Hawking», un fenomeno della fisica dei buchi neri predetto da Stephen Hawking nel 1974.

La domanda che si è naturalmente posta riguardo all’esperimento di Steinhauer è se il suo risultato si possa considerare una conferma sperimentale dell’ipotesi di Hawking. Più in generale: che cosa ci può garantire dal punto di vista epistemologico l’esito di un esperimento analogo? E poi: c’è differenza, riguardo alla possibilità di conferma, tra un esperimento analogo e le simulazioni al computer, uno strumento molto usato nella pratica scientifica? Queste domande sono al centro di una discussione filosofica già molto viva, per quanto recente.

di Giorgio Manzi

ordinario di paleoantropologia alla Sapienza Università di Roma;
socio corrispondente dell'Accademia Nazionale dei Lincei

I crani di Apidima

Le caratteristiche dei fossili ritrovati in Grecia non giustificano conclusioni azzardate

Che fatica! Qui le novità sono all'ordine del giorno. E che clamorosa novità è quest'ultima, almeno per chi conosce quanto fino a oggi si sapeva (o si pensava di sapere) sul popolamento dell'Europa dopo circa mezzo milione di anni fa, ossia nel Pleistocene medio.

Katerina Harvati – eccellente mia collega di origini greche, che da tempo è professore all'Università di Tubinga, in Germania – ha pubblicato il 10 luglio scorso su «Nature» con altri ricercatori l'analisi di due crani fossili, scoperti alla fine degli anni settanta nella grotta di Apidima, in Grecia. Il giorno dopo, la notizia aveva già un posto sulla pagina di Wikipedia dedicata alle migrazioni preistoriche.

Suona pressappoco così: un nuovo studio segnala che due crani fossili, scoperti uno accanto all'altro nelle brecce concrezionate della grotta, sono rispettivamente riferibili a un *Homo sapiens* più antico, di 210.000 anni fa (Apidima 1, costituito da una porzione di volta cranica) e a un Neanderthal di oltre 170.000 anni fa (Apidima 2, reperto più completo anche se frammentario). La notizia, anzi le notizie (comprese le nuove datazioni) sono certo di grande interesse, ma è addirittura folgorante quella che riguarda Apidima 1, poiché indicherebbe che uomini di aspetto moderno precedettero di almeno 165.000 anni i «primi» *H. sapiens* arrivati in Europa intorno a 45.000 anni fa.

Impugnare il rasoio

Non mi prendete per un ottuso conservatore, ma vi devo dire che (in direzione ostinata e contraria alla tendenza del momento) non sono affatto convinto di questa affermazione. Ritengo invece che i miei colleghi dimentichino un principio che è ritenuto alla base del pensiero scientifico – il cosiddetto «rasoio di Occam» – in base a cui è da preferire l'ipotesi che appare più sintetica e ragionevole, senza ricorrere a inutili complicazioni e a nuovi fattori causali, ancorché argomentati.

Mi spiego meglio. Il punto su cui, nel nostro poco spazio, mi posso soffermare è tutto nella definizione di *H. sapiens*: un problema che abbiamo incontrato altre volte (specie ultimamente) fra i temi di questa rubrica.

Non è sufficiente che da analisi, per quanto sofisticate, emerga che il contorno di una porzione posteriore della volta cranica (Apidima 1) non abbia chiare caratteristiche da Neanderthal (a differenza di Apidima 2), e che le analisi statistiche multivariate lo pongano all'interno della variabilità moderna, per dire che si tratta di un *H. sapiens*. Non dovrei essere io a ricordare a miei autorevoli colleghi che nel Pleistocene medio, prima della comparsa dei Neanderthal più antichi e arcaici (come Apidima 2) si aveva una notevole variabilità di forme, che include caratteristiche confondibili anche con l'anatomia moderna.

Troppe inferenze

Non è un caso che nel corso del Novecento si siano affermate teorie tipo quella dei «pre-*sapiens*», che proprio in alcuni fossili del tardo Pleistocene medio vedevano affinità (e una possibile relazione evolutiva) con l'anatomia moderna e non con i successivi Neanderthal, specie i cosiddetti «classici».

Per quanto caratteristiche da Neanderthal fossero già presenti nelle popolazioni umane di allora, lo erano in maniera discontinua: in certi reperti alcune, in certi altre, in altri nessuna. È proprio su questa osservazione che si basa il cosiddetto *accretion model*, che identifica nel progressivo accumulo di caratteri l'evoluzione di *H. neanderthalensis*.

È dunque ragionevole che un fossile del Pleistocene medio (peraltro parziale) non presenti caratteri da Neanderthal, senza per questo pensare che si tratti di *H. sapiens*, con tutta quella formidabile cascata di inferenze che abbiamo letto un po' ovunque in questi giorni e che credo farebbero rabbrividire il buon Guglielmo da Occam.

di Amedeo Balbi

professore associato di astronomia e astrofisica
al Dipartimento di fisica dell'Università di Roma Tor Vergata

Salvate l'eredità delle missioni Apollo

Oggetti e tracce lasciate dagli astronauti che hanno raggiunto la Luna potrebbero rischiare di scomparire

Facciamo un piccolo esercizio di immaginazione: è il settembre del 2069, e da un paio di mesi l'umanità ha finito di celebrare il centenario della prima passeggiata spaziale di Neil Armstrong e Buzz Aldrin. I più fortunati (e ricchi) hanno anche avuto l'occasione di partecipare ai festeggiamenti che si sono tenuti sul luogo dell'allunaggio, con l'inaugurazione del parco Tranquillity Base 1969, un'attrazione turistica finanziata da un gruppo di investitori privati che porterà i visitatori in un percorso guidato attraverso gli oggetti e le tracce lasciate dagli astronauti un secolo prima.

Sfortunatamente, non tutto è rimasto esattamente come nel luglio 1969. Vent'anni prima, un maldestro tentativo di alcuni studenti di ingegneria aerospaziale di filmare il luogo dell'allunaggio con una piccola sonda automatica si è concluso con un impatto sulla superficie che ha cancellato parte delle impronte lasciate dagli astronauti. I turisti, dunque, vedranno impronte ricostruite in modo il più possibile fedele alla realtà storica, mentre i restanti oggetti originali potranno essere osservati solo attraverso una cupola protettiva, progettata per evitare il ripetersi di incidenti simili.

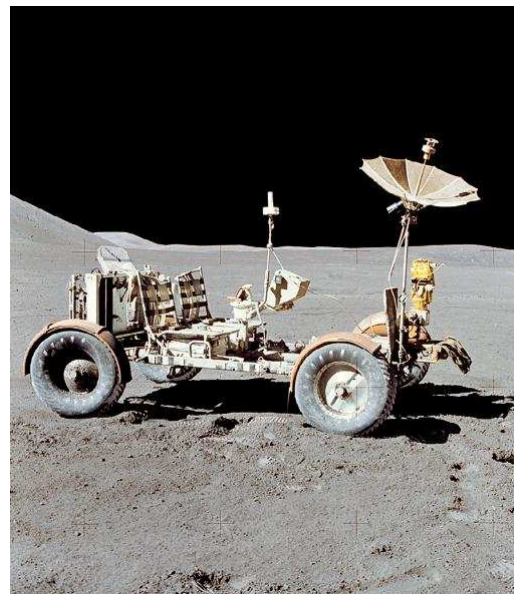
Un vuoto legale

Fantascienza? Non proprio. In occasione dei recenti festeggiamenti per il cinquantenario dell'allunaggio, la questione di come (e se) preservare le testimonianze storiche delle missioni Apollo è tornata d'attualità. L'11 luglio scorso, il «New York Times» ha dedicato un lungo articolo alla questione, che è più intricata di quanto si possa pensare. Perché se è vero, come spesso si racconta, che le tracce degli astronauti sulla Luna potrebbero restare inalterate per decine o centinaia di migliaia di anni (vista l'assenza di atmosfera e di fenomeni geologici), è vero anche che non c'è niente che impedisca che siano modificate o cancellate dall'intervento di esseri umani. Sia il trattato delle Nazioni Unite sullo spazio del 1967, che la sua estensione del 1979 esplicitamente riguardante la Luna, stabiliscono che lo spazio e i corpi celesti sono di tutta l'umanità, e che nessuno Stato può reclamarne la proprietà.

Il principio è sacrosanto, ma questo significa anche che al momento non c'è, legalmente, alcun modo di proteggere porzioni del suolo lunare, o di regolare le attività di future missioni nei luoghi storici. I singoli oggetti lasciati sul suolo lunare (come i moduli delle missioni Apollo) restano di proprietà dei governi che li hanno costruiti e ce li hanno portati. Ma per il resto, quasi tutto è permesso.

Lascito per l'umanità

A differenza di cinquant'anni fa, oggi le possibilità tecniche per raggiungere la Luna non sono solo dei governi nazionali. Uno dei premi previsti dal Google Lunar X Prize, quando è stato lanciato nel 2007, era per un progetto che fosse stato in grado di fotografare i resti delle missioni Apollo (il premio non è mai stato assegnato). Nel 2011, la NASA ha emanato linee guida non vincolanti per la conservazione dei luoghi storici dell'allunaggio, in seguito ha negato il suo appoggio a compagnie non in linea con quelle indicazioni. Ma la cosa non impedisce ad altri di andare per la propria strada. Di recente, la compagnia tedesca PTScientist ha annunciato il piano di una missione che dovrebbe raggiungere il sito dell'Apollo 17 per studiare lo stato degli oggetti e delle tracce lasciate dall'ultimo equipaggio umano sulla Luna.

Sono tutti indizi di una nuova gara per la Luna, che nasconde anche grandi interessi commerciali, oltre che geopolitici. Dietro le complicazioni legali, c'è però in gioco anche l'eredità storica di una delle imprese più importanti che la nostra specie abbia compiuto, e la domanda su chi debba custodirla, per tutta l'umanità.

Il primo rover. Il 31 luglio 1971, nell'ambito della missione Apollo 15, venne usato per la prima volta un rover lunare (o LRV da Lunar Rover Vehicle). Questo, altri LRV e numerosi oggetti lasciati dagli astronauti che hanno visitato la Luna, testimoniano una delle imprese più importanti tra quelle compiute dalla nostra specie.

Cortesia NASA

CAMBIAMENTO CLIMATICO

Alberi contro la febbre della Terra

Una riforestazione di tutto il pianeta mitigherebbe il riscaldamento globale

Stephen Shepherd/AGF

Pozzi di CO_2. Uno studio ha dimostrato che sarebbe possibile piantare alberi su circa 0,9 miliardi di ettari sparsi nel globo, innescando così un processo che assorbirebbe l'equivalente di due terzi dell'anidride carbonica immessa in atmosfera dalle attività umane dall'Ottocento a oggi.

Se vogliamo contenere il riscaldamento globale entro gli 1,5°C nel 2050, una delle cose da fare è aumentare le terre ricoperte da alberi di un miliardo di ettari (circa 33 volte l'Italia). Lo afferma l'ultimo rapporto dell'Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC), ma che fosse possibile, nessuno ne era sicuro. Tecnicamente lo spazio c'è, afferma ora su «Science» un gruppo guidato da Jean-Francois Bastin e Tom Crowther del Politecnico federale di Zurigo. Ma il tempo, invece, stringe.

Gli scienziati hanno usato un'enorme raccolta di osservazioni satellitari su quasi 80.000 aree forestali su tutto il globo e il programma di analisi Google Earth Engine, per creare un modello della copertura arborea che si potrebbe raggiungere sull'intera superficie terrestre in base ai suoli e ai climi delle varie regioni. Sottraendo gli alberi già esistenti e le aree urbane e agricole, resta spazio per 0,9 miliardi di ettari aggiuntivi, circa quanto auspicato dall'IPCC. Una volta cresciuti, questi alberi catturerebbero oltre 200 miliardi di tonnellate di anidride carbonica: due terzi di quanto immesso dall'umanità in atmosfera dall'Ottocento a oggi, o cinque anni di emissioni globali ai tassi del 2018, sebbene la stima sia grossolana, precisano gli autori. Anche quanto costerebbe non è chiaro, ma Crowther azzarda 300 miliardi di dollari. «Il ripristino degli ecosistemi è la via più efficace che abbiamo per mitigare il cambiamento climatico», concludono gli studiosi. «Ma dobbiamo sbrigarci: proprio il cambiamento del clima sta riducendo le capacità di crescita delle foreste, e potrà ridurre di un quarto la copertura potenziale entro il 2050».

Anche a prescindere dalla corsa contro il tempo, e dalla necessità di tante altre misure a partire dal calo delle emissioni, la riforestazione, seppure importante, non è una panacea, avvertono però nel commento su «Science» Robin Chazdon, dell'Università del Connecticut, e Pedro Bancalion dell'Università di San Paolo del Brasile.

Oltre ai benefici climatici, la riforestazione offre vantaggi aggiuntivi, per esempio per la biodiversità, ma può avere anche controindicazioni, dall'aumento del rischio di incendi al depauperamento delle riserve idriche e via dicendo. Molto dipende da dove e come la si fa. Un conto è per esempio disseminare a tappeto un'unica specie arborea, tutt'altro ripristinare gli ecosistemi locali e coinvolgere nella gestione delle terre le comunità locali. Serve inoltre un approccio di respiro globale, che integri su larga scala i vari tipi di interventi e i rispettivi benefici, non singoli progetti frammentati, concentrati ciascuno su una sola area e un solo obiettivo. «Se non si curano questi aspetti, sul lungo termine l'operazione rischia di essere inefficace», osservano Chazdon e Bancalion.

Giovanni Sabato

ASTROBIOLOGIA

Una nuova definizione di zona abitabile

Anche la composizione dell'atmosfera ha un ruolo nella possibilità di vita

Nella ricerca di pianeti extrasolari, gli astronomi pongono particolare attenzione a quelli individuati nella regione circumstellare denominata «zona abitabile». Solo in questa zona, diversa da stella a stella, possono trovarsi pianeti con acqua allo stato liquido in superficie. La Terra, per esempio, è l'unico pianeta a trovarsi all'interno della zona abitabile del Sole.

Tuttavia, una ricerca effettuata da un gruppo guidato da Edward Schwieterman dell'Università della California a Riverside, pubblicata su «Astrophysical Journal», mostra che per sviluppare forme di vita complesse – come appunto è accaduto sul nostro pianeta – non è sufficiente trovarsi alla distanza giusta dalla propria stella, perché è importante anche la composizione dell'atmosfera.

Sulla Terra, l'attuale concentrazione di gas serra CO_2 (anidride carbonica) permette di avere stabilmente una temperatura superficiale media che mantiene l'acqua liquida; concentrazioni maggiori, però, come quelle rilevate in alcuni pianeti extrasolari (e su Marte, per esempio), possono rendere l'atmosfera tossica per forme di vita di tipo terrestre.

Così, Schwieterman e colleghi hanno sviluppato simulazioni basate su modelli teorici climatici e atmosferici di diversi esopianeti, valutando proprio l'impatto dell'anidride carbonica appunto, e del monossido di carbonio (CO).

La scoperta dei ricercatori è che occorre ridefinire il concetto di zona abitabile, delimitandolo ulteriormente sulla base delle concentrazioni di questi gas, che non devono raggiungere livelli tossici per la vita complessa. La nuova regione, denominata Habitable Zone for Complex Life (HZCL), diventa così una frazione anche molto ridotta rispetto a quella originaria e taglia fuori alcuni pianeti considerati promettenti, come quelli attorno a Proxima Centauri e a Trappist-1.

Emiliano Ricci

Prevedere i salti quantistici

In meccanica quantistica, prevedere il «salto» repentino di un sistema tra diversi livelli di energia è da sempre considerato impossibile.
Ora però un esperimento realizzato da ricercatori della statunitense Yale University, guidati da Michel Devoret, sembrerebbe dimostrare il contrario: gli scienziati hanno infatti evidenziato la possibilità di controllare e invertire le transizioni tra diversi stati quantistici. I risultati sono stati pubblicati su «Nature».
L'esempio più classico dell'imprevedibilità di un sistema quantistico è quello del «gatto di Schrödinger»: se si immagina di chiudere in una scatola un ipotetico gatto «quantistico», in presenza di un meccanismo in grado di diffondere veleno in modo casuale, il gatto si troverà in uno stato sovrapposto di vita e di morte. Solo l'apertura della scatola, cioè una misurazione diretta dello stato del sistema, permette di scoprire il destino del gatto. Prima è impossibile prevederlo.
Più in generale, il modello atomico proposto nel 1913 dal fisico danese Niels Bohr prevede l'esistenza negli atomi di livelli discreti di energia e la possibilità, per gli elettroni, di «saltare» da un livello all'altro (anche qui in modo imprevedibile). Devoret e colleghi hanno riprodotto artificialmente il comportamento quantistico di un atomo con un piccolo circuito superconduttore (in cui la corrente scorre senza resistenza), in grado di spostarsi fra tre distinti stati energetici. Dopo aver fornito energia all'atomo artificiale irradiandolo con microonde, gli scienziati hanno osservato che la transizione dal primo al terzo stato (il più energetico) è sempre preceduta da un breve periodo di «quiete», in cui non accade nulla: ciò implica che è possibile prevedere il salto energetico, tanto che gli scienziati in alcuni casi sono riusciti a impedirlo e addirittura invertirlo. Il risultato, oltre a mettere in discussione uno dei cardini della meccanica quantistica, apre la strada ad applicazioni molto promettenti, specie nell'informatica quantistica.

Matteo Serra

Cortesia NASA/JPL-Caltech

PLANETOLOGIA

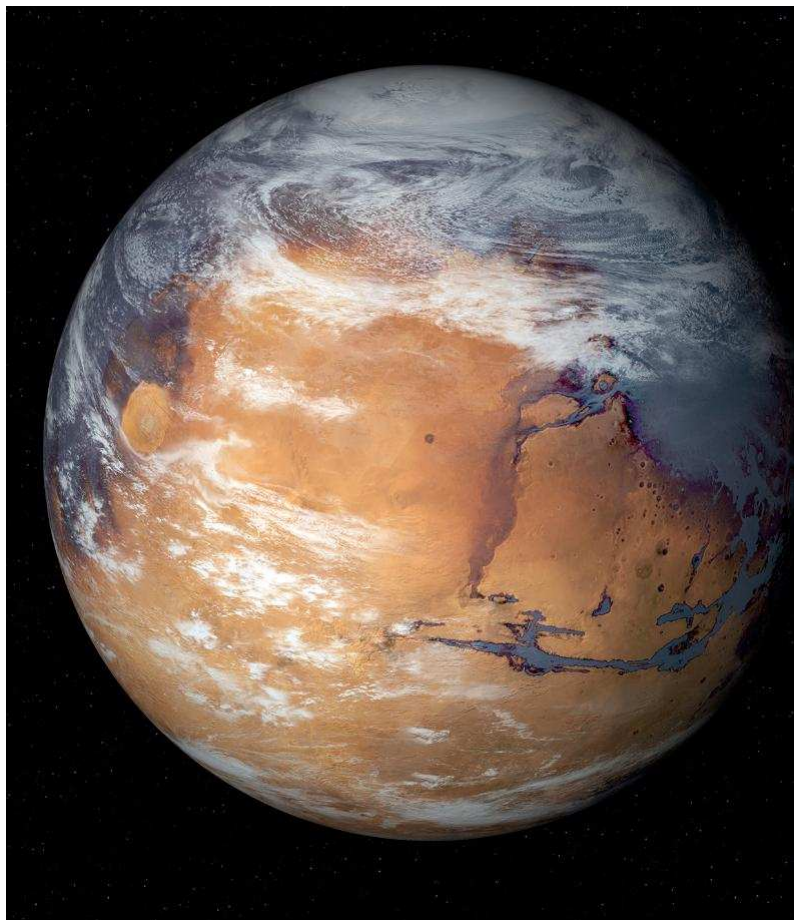
Trasformare Marte con l'aerogel

Un semplice materiale potrebbe aiutare a rendere il Pianeta Rosso simile alla Terra

La proposta di modificare l'atmosfera marziana per trasformare il Pianeta Rosso in un luogo abitabile fu presentata per la prima volta dall'astrofisico Carl Sagan nel 1971. L'idea, già allora, era vaporizzare l'anidride carbonica solida (il cosiddetto ghiaccio secco) e il ghiaccio d'acqua presenti nelle calotte polari marziane per immetterli nell'atmosfera, in modo da creare un effetto serra sufficiente a innalzare la temperatura superficiale. Nel corso del tempo sono state ipotizzate varie soluzioni di terraformazione, ovvero di processi con cui modificare l'ambiente marziano per renderlo simile a quello della Terra, ma finora nessun modello si è dimostrato praticabile. Ora, un gruppo guidato da Robin Wordsworth, della Harvard University, ha proposto una nuova tecnica che prevede l'impiego di aerogel di silice, un materiale con una densità molto bassa, ma estremamente efficace nell'isolamento termico.

Come descritto su «Nature Astronomy», tramite una serie di simulazioni e di esperimenti effettuati in laboratorio, Wordsworth e colleghi hanno scoperto che con uno strato sottile di 2-3 centimetri di aerogel di silice collocato sopra una regione marziana si potrebbero produrre condizioni ottimali per la terraformazione di quell'area. L'aerogel di silice è sufficientemente trasparente da far passare una quantità di luce sufficiente a rendere possibile la fotosintesi, ma, allo stesso tempo, protegge dai raggi ultravioletti. Oltre a questo, sarebbe in grado di produrre un effetto serra detto «a stato solido» che riesce a mantenere la temperatura stabilmente al di sopra del punto di fusione dell'acqua senza alcuna necessità di fonti di calore interne. Fra l'altro, l'uso di pannelli di questo materiale posti in varie parti della superficie di Marte produrrebbe solo alterazioni atmosferiche locali, non a livello planetario. Prima di usarlo su Marte, i ricercatori suggeriscono di provarlo in zone estreme del nostro pianeta.

Emiliano Ricci

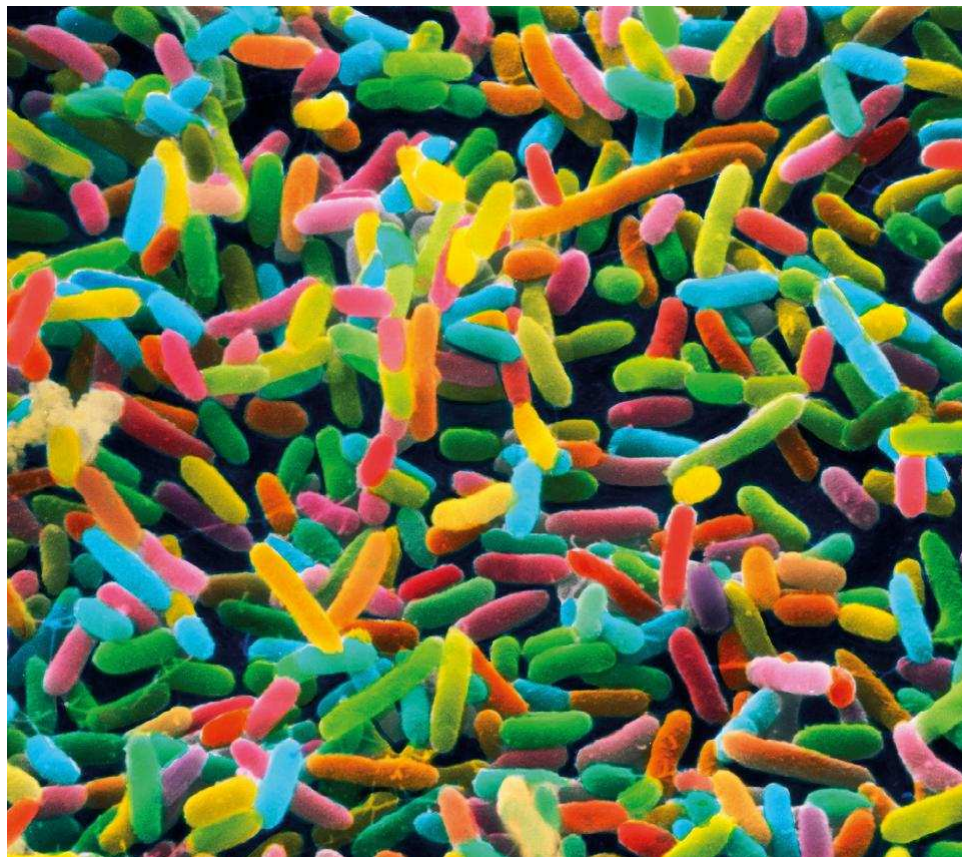
Detlev van Ravenswaay/SPL/AGF

Nuovi dati per il bosone di Higgs

Il bosone di Higgs svela i suoi segreti. A sette anni dalla sua scoperta, i ricercatori degli esperimenti ATLAS e CMS del CERN di Ginevra hanno analizzato nel dettaglio i dati relativi al comportamento e alle proprietà del bosone, registrati nella seconda presa dati (il cosiddetto Run 2) dell'acceleratore Large Hadron Collider (LHC) tra il 2015 e il 2018. I risultati, presentati lo scorso luglio alla High-Energy Physics Conference dell'European Physical Society svoltasi a Ghent, in Belgio, confermano che le caratteristiche osservate della particella elementare sono compatibili con le previsioni del modello standard, la teoria che descrive il comportamento di tre delle quattro forze fondamentali e delle particelle elementari note.
Le proprietà dell'Higgs hanno un ruolo decisivo nel modello: il bosone è la particella associata al cosiddetto «campo di Higgs», che permea l'intero universo conferendo la massa a tutte le particelle elementari. Si tratta di una particella fortemente instabile: una volta prodotta, decade quasi all'istante trasformandosi in altre particelle elementari più leggere. Ed è proprio studiando questi decadimenti che i ricercatori possono trarre informazioni sul bosone. In particolare, l'enorme quantità di dati raccolti nel Run 2 (frutto di oltre dieci milioni di miliardi di collisioni tra protoni in LHC) ha permesso di studiare con un elevato livello di dettaglio il decadimento dell'Higgs in due bosoni Z (mediatori della forza nucleare debole, associata alla radioattività) e quello in un due fotoni, verificando l'accordo con la teoria.
Non solo: i ricercatori hanno indagato anche alcuni decadimenti dell'Higgs rari e difficili, tra cui quello in una coppia di muoni (particelle di carica elettrica negativa, simili agli elettroni). In questo caso i risultati sono promettenti, ma per avere risposte più chiare sarà necessario attendere il prossimo ciclo di presa dati, che partirà nel 2021.

Matteo Serra

EVOLUZIONE

Mutazioni nascoste ma efficaci

Confermato il ruolo evolutivo delle mutazioni criptiche

Le mutazioni neutrali (o criptiche), cioè che non hanno effetti apprezzabili sul fenotipo, sono una fonte importante di variazione evolutiva. L'ipotesi sussiste da tempo, ma finora aveva scarse prove, e c'è chi ha avanzato l'ipotesi opposta, vale a dire che queste mutazioni frenino l'adattamento evolutivo. Ora un esperimento pubblicato su «Science» la conferma: se le condizioni cambiano, le mutazioni criptiche possono diventare decisive nell'adattamento di una popolazione di batteri *Escherichia coli*.

Andreas Wagner, evoluzionista all'Università di Zurigo, ha studiato il gene che codifica per una proteina fluorescente gialla. Per varie generazioni successive, il gene è stato mutagenizzato (cioè vi sono state indotte mutazioni casuali) e introdotto nei batteri, selezionando ogni volta i batteri il cui giallo fluorescente era pressoché immutato. Così il gene ha accumulato molte mutazioni neutrali. Poi la regola selettiva è cambiata. La proteina gialla aveva anche una debole emissione verde, e Wagner ha selezionato per varie generazioni i batteri dal verde più marcato, fino a ricavare una proteina fluorescente verde.

Ebbene, rispetto ai batteri nativi sottoposti alla stessa selezione per il verde, quelli che prima avevano accumulato una riserva di mutazioni neutrali hanno raggiunto l'obiettivo più in fretta. Ma non solo: lo hanno fatto percorrendo un numero molto più grande di traiettorie evolutive, inaccessibili ai batteri ordinari, fino a produrre proteine dal verde più intenso. Questo grazie a un repertorio di mutazioni che si erano diffuse nel precedente ambiente selettivo, ma che sarebbero state subito eliminate dalla nuova selezione per il verde e infatti non si sono affermate nei batteri nativi.

Oltre a confermare il ruolo delle mutazioni neutrali, queste osservazioni potranno aiutare i processi di selezione diretta di biomolecole con determinate funzioni, per esempio terapeutiche.

Giovanni Sabato

Come avere un bovino amico dell'ambiente

Il problema dell'inquinamento causato dagli allevamenti (il 37 per cento delle emissioni antropiche di metano proviene dal bestiame) è così urgente che nel 2012 l'Europa ha finanziato il progetto RuminOmics per cercare soluzioni. Nel progetto ricade uno studio pubblicato di recente su «Science Advances», firmato, tra gli altri, da John Williams del Parco Tecnologico Padano. I ricercatori hanno studiato genoma e microbioma del rumine, un organo del sistema digerente dei ruminanti, ed emissioni di metano in oltre 1000 mucche delle razze da latte più diffuse in Europa, rilevando che numerosità e tipo di microrganismi produttori di metano sono in gran parte determinati dal DNA dell'ospite.
Se il microbioma del rumine è anche geneticamente determinato «possiamo selezionare, e far accoppiare, mucche con meno batteri metano-produttori nel rumine», ha spiegato Williams. È verosimile che l'ereditarietà del microbioma valga anche per i bovini da carne, ma il successo degli incroci tra mucche *eco-friendly* dipenderà da quanto la selezione tarata sul metano influirà su altre caratteristiche, come produzione del latte o resistenza alle malattie.
I primi dati promettono bene: le mucche che producono meno metano fanno anche più latte.

Martina Saporiti

SPL/AGF (Escherichia coli)

INQUINAMENTO

Nanotecnologie contro le microplastiche

Realizzato un dispositivo in grado di neutralizzare i piccoli frammenti di plastica

Catturare e rendere innocue le microplastiche – i minuscoli frammenti di plastica che si stanno accumulando sempre di più nei nostri mari – è un'impresa difficile. Da un lato, sono prodotte in grande quantità, sia direttamente (nel caso di alcuni cosmetici) sia indirettamente, con la disgregazione di frammenti di plastica più grandi. Ma soprattutto, sono troppo piccole per essere filtrate nei processi industriali di trattamento delle acque

Un gruppo di ricerca australiano ha ora individuato un possibile rimedio: un dispositivo a forma di molla basato su nanomagneti in carbonio. Frutto del lavoro dell'Università di Adelaide, è descritto sulla rivista «Matter» da Shaobin Wang e colleghi.

Un approccio chimico per eliminare le microplastiche ricorre a composti dell'ossigeno detti «specie reattive dell'ossigeno» che innescano reazioni a catena in grado di spezzare le lunghe molecole delle microplastiche in frammenti ancora più piccoli e innocui. Tuttavia, le specie reattive dell'ossigeno si producono usando metalli pesanti, come ferro e cobalto, che rischiano anch'essi di produrre inquinamento.

La soluzione di Wang e colleghi invece ha un basso impatto ambientale. Si basa su nanotubi di carbonio, reticoli di dimensioni nanoscopiche di soli atomi di carbonio che assumono la forma di strutture tubolari, dopati con azoto e associati a nanoparticelle metalliche. Questi «nanoibridi» catalizzano l'attivazione di un'altra sostanza chimica, il perossimonosolfato, generando così specie reattive dell'ossigeno che degradano le microplastiche.

Per i loro minuscoli dispositivi, i ricercatori hanno scelto una forma a molla, che garantisce un'elevata stabilità e rende massima la superficie di reazione, velocizzando la catalisi: nei test, i nanoibridi hanno dimostrato di rimuovere le microplastiche disperse in una vasca di acqua in poche ore. Inoltre, Wang e colleghi hanno aggiunto manganese ai nanoibridi, in modo da renderli magnetici: in questo modo, dopo la depurazione è possibile recuperarli e riutilizzarli.

Il risultato è molto incoraggiante, e gli autori sono già al lavoro per rendere l'approccio efficiente su diversi tipi di microplastiche e garantire l'assenza di tossicità di ogni composto chimico coinvolto nel processo.

Carola Bimbi

PALEOANTROPOLOGIA

Allattamenti ancestrali

Come alimentava la prole *Australopithecus africanus*

P.Plailly/E.Daynes/SPL

***Australopithecus* è uno dei generi** più antichi della famiglia degli ominidi che appartiene alla stessa linea evolutiva degli esseri umani. Probabilmente il primo genere di primati ad assumere l'andatura eretta, gli australopitechi erano comunque in grado anche di arrampicarsi sugli alberi; molti paleontologi ritengono che proprio dalla specie *Australopithecus africanus*, più di due milioni di anni fa, siano emersi i progenitori del genere *Homo*.

Di recente, sull'alimentazione della prole di *A. africanus* è stato effettuato uno studio coordinato da Renaud Joannes-Boyau Southern Cross University, in Australia, che ha visto la collaborazione anche degli italiani Stefano Benazzi dell'Università di Bologna e Luca Fiorenza dell'australiana Monash University, e che è stato pubblicato su «Nature». Grazie all'impiego di tecniche di spettrometria di massa su denti fossili, i ricercatori sono riusciti a ricostruirne una sorta di mappatura geochimica che ha dimostrato che la specie aveva un periodo di esclusivo allattamento molto breve ma che le madri erano pronte a riprendere in caso di scarsità di cibo.

In particolare, nei denti, durante la crescita, si formano strati che forniscono informazioni sull'alimentazione nelle fasi della vita. Fino a non molto tempo fa, però, la tecnologia non era in grado di svelare i segreti in queste stratificazioni, mentre oggi è possibile vaporizzare microscopiche porzioni della superficie dei campioni fossili e analizzare le sostanze ottenute.

I risultati hanno dimostrato che le condizioni ambientali in cui viveva *A. africanus* erano molto difficili a causa di frequenti periodi di siccità alternati a piogge torrenziali: di conseguenza, molto probabilmente questa strategia di alimentazione «su richiesta» dei piccoli si è rivelata fondamentale per la sopravvivenza della specie.

Marina Semiglia

Gli ecosistemi degli Stati Uniti fuggono verso nord

Chi insiste a negare il cambiamento climatico, spesso non si rende conto che ci sono prove del fenomeno che non hanno nulla a che fare con climatologi, modelli al computer o termometri. Come quella pubblicata su «Nature Climate Change» da Caleb Roberts, dell'Università del Nebraska, che ha verificato se negli Stati Uniti, negli ultimi decenni, fosse avvenuto uno spostamento degli ecosistemi a causa delle influenze antropiche. Roberts ha esaminato i dati registrati negli ultimi 46 anni sul territorio occupato da 400 specie di uccelli negli Stati centrali della federazione. È così risultato che il confine nord del loro areale si è spostato verso l'Artico di 600 chilometri, e che il confine sud si è spostato per 450 chilometri, sempre verso nord: un'evidente ricerca di climi più freschi.
«In realtà, come accade spesso in ecologia, le ragioni di questo fenomeno sono varie: dallo sviluppo agricolo agli incendi fino all'invasione di alberi nelle praterie. Ma il cambiamento climatico è certo una delle cause principali ed è anche intrecciato con le altre: più caldo porta a più incendi, per esempio. Le praterie sono fra gli ambienti naturali più minacciati del mondo: la fuga degli uccelli verso nord dalle praterie del Midwest, è il primo segnale di un loro possibile collasso», ha avvertito Roberts.

Alex Saragosa

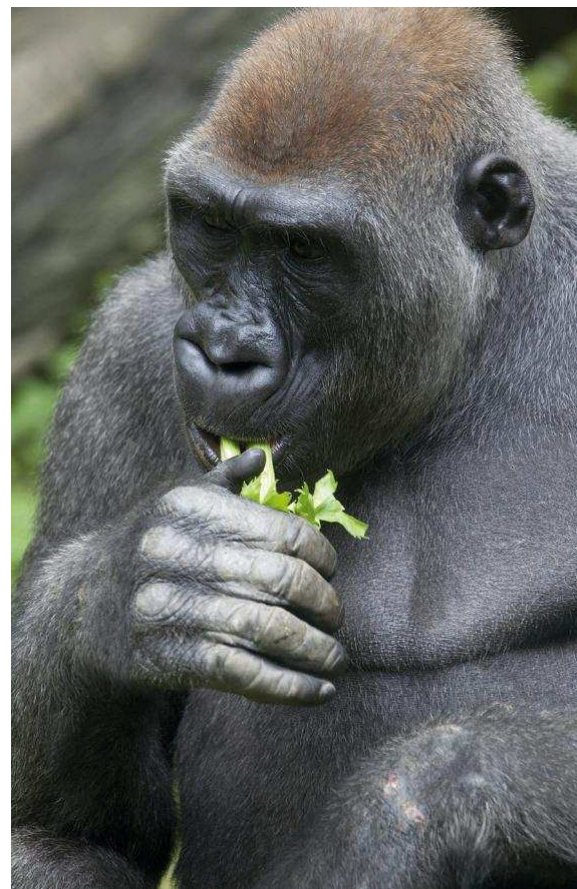
In Sardegna un premio che valorizza donne e scienza

Per superare gli stereotipi che ancora condizionano le donne, lontane da un'effettiva parità di genere nella ricerca e nelle pubblicazioni scientifiche, viene indetta la prima edizione del premio Donna di Scienza. L'obiettivo è offrire un riconoscimento a figure femminili che abbiano contribuito a dare prestigio alla Sardegna in campo scientifico. Il premio è rivolto a donne, nate oppure operanti in Sardegna o per la Sardegna, e che abbiano svolto attività nel campo della ricerca scientifica, della didattica della scienza, della diffusione della cultura scientifica, anche attraverso i mezzi di comunicazione. Le candidature, comprensive di curriculum, categoria di riferimento e una chiara descrizione del legame della candidata con la scienza e con la Sardegna, dovranno pervenire entro il 30 settembre 2019 per e-mail a Carla Romagnino, presidente dell'Associazione ScienzaSocietàScienza (presidente@scienzasocietascienza.eu). La vincitrice riceverà un premio in denaro di 2000 euro (è in corso un *crowfunding* su Eppela per sostenere il premio) nel corso di una cerimonia speciale in occasione del Cagliari Festival Scienza che si svolgerà a Cagliari dal 7 al 12 novembre 2019. Per informazioni: www.festivalscienzacagliari.it; https://www.facebook.com/premiodonnadiscienza. (*CaBi*)

Le società dei gorilla così simili alle nostre

Spiando la vita intima dei gorilla occidentali (*Gorilla gorilla*), alcuni ricercatori hanno scoperto un'organizzazione sociale simile alla nostra. E questo, scrivono sui «Proceedings of the Royal Society B» in uno studio coordinato da Robin Morrison dell'Università di Cambridge, significa che forse le origini delle società umane risalgono all'ultimo progenitore in comune con i gorilla, e non sono frutto del famoso «cervello sociale» degli ominini.

Analizzando con algoritmi i dati raccolti in sei anni sulle interazioni tra quasi 700 gorilla maschi e femmine e loro figli nella Repubblica Democratica del Congo, i ricercatori hanno svelato l'esistenza di una gerarchia sociale multilivello come la nostra: le famiglie «tradizionali» formano gruppi più ampi all'interno dei quali si creano legami non necessariamente di parentela.

Ci sono circoli di parenti (una media di 13 individui) e di amici (una media di 39 individui), e più dell'80 per cento delle relazioni dei gorilla *silverbacks* maschi è con altri maschi dominanti lontanamente o non imparentati. L'equivalente di un'amicizia di lunga data, mentre a oggi la capacità di formare legami e cooperare con estranei era considerata una prerogativa degli esseri umani e del loro «cervello sociale». (*MaSa*)

Riscaldamento globale da scie di condensazione

Le scie di condensazione che si formano ad alta quota dietro gli aerei, estendendosi in orizzontale, creano cirri di origine antropica. Queste nubi hanno un'influenza sulle radiazioni in ingresso e uscita dalla Terra, il cui bilancio determina mediamente la temperatura superficiale. Poiché si prevede che dal 2006 al 2050 il traffico aereo aumenti di quattro volte, l'influsso degli aerei sul futuro riscaldamento globale va studiato accuratamente, con particolare riguardo alle conseguenze delle scie di condensazione, il cui ruolo è stato poco analizzato. «Atmospheric Chemistry and Physics» ha pubblicato uno studio di Lisa Bock e Ulrike Burkhardt, dell'Istituto tedesco di fisica dell'atmosfera del Deutsches Zentrum für Luft- und Raumfahrt a Oberpfaffenhofen. Le ricercatrici hanno usato un modello climatico associato a un modulo per lo studio delle scie di condensazione e dei cirri, dimostrando che l'impatto sul riscaldamento del pianeta delle nuove formazioni di scie potrebbe triplicare. L'uso di carburanti più ecologici e l'efficienza più elevata dei propulsori non riusciranno probabilmente a compensare l'aumento di traffico. Infine, l'impatto dell'aumento di scie sarà più forte di quello delle emissioni di CO_2 derivanti dal maggior combustibile usato. (*AnPa*)

yellowpaul/iStock (*scie*); JaysonPhotography/iStock (*gorilla*)

Come allucinare il cervello dei topi

Basta attivare pochi neuroni nella corteccia visiva dei topi per far visualizzare loro un'immagine inesistente. Lo mostrano due studi indipendenti, uno pubblicato su «Cell» da Rafael Yuste della Columbia University, l'altro su «Science» da Karl Deisseroth della Stanford University.

Gli studiosi hanno addestrato i topi a leccare acqua quando vedevano un serie di righe verticali ma non righe orizzontali, o viceversa, e hanno individuato i gruppi di neuroni che rispondevano di preferenza all'una o all'altra immagine. Con una sofisticata tecnica di optogenetica – che permette di accendere a comando i neuroni desiderati grazie a fasci laser – hanno poi riattivato gli stessi gruppi di neuroni. I topi così stimolati reagivano con prontezza alle righe anche quando erano appena visibili o non c'erano affatto. A volte, bastavano addirittura due neuroni per evocare la «visione».

Com'è ovvio non si può sapere se i topi vedessero letteralmente le righe, ma sia i loro comportamenti sia l'attività cerebrale corrispondevano ai comportamenti e all'attività di una percezione reale. Che bastino così pochi neuroni ha sorpreso i ricercatori, e se lo stesso accade negli esseri umani potrebbe spiegare la facilità con cui compaiono allucinazioni e pensieri intrusivi. (*GiSa*)

Rifiuti speciali: l'Italia ricicla di più

L'Italia continua ad aumentare la produzione di rifiuti speciali, cioè quelli «non urbani», provenienti da attività come industria, edilizia e agricoltura, ma segna anche record nel riciclarli.

Lo rivela il rapporto *Rapporto rifiuti speciali* del 2019 pubblicato dall'ISPRA che ha censito – sono dati del 2017 – 140 milioni di tonnellate di questa categoria di scarti, quasi cinque volte quelli urbani, con una crescita del tre per cento sul 2016. Di questi, però, ben 112 milioni, cioè l'80 per cento, un record europeo, sono stati riciclati o recuperati, con metodi che vanno dal riutilizzo della materia prima, al compost fino alla combustione in cementifici. Siamo tanto bravi a riutilizzare rifiuti speciali che nel 2017 abbiamo importato sei milioni di tonnellate e abbiamo esportato tre milioni di tonnellate di questi rifiuti.

Il 41 per cento del loro totale viene dall'edilizia: calcinacci, che per lo più finiscono in nuove fondamenta e piani stradali. Un altro quarto arriva dagli stessi centri di riciclo (è la parte scartata perché non riciclabile) e dalle bonifiche ambientali e solo un 21 per cento è prodotto dalle industrie: a cui però si deve gran parte dei 9,7 milioni di tonnellate di rifiuti «pericolosi» del 2017, una quantità rimasta peraltro quasi invariata rispetto al 2016. (*AlSa*)

Fragili asteroidi

Gli asteroidi di tipo C, ricchi di carbonio, rappresentano circa il 75 per cento della popolazione di asteroidi conosciuta. Tuttavia, l'analisi delle meteoriti cadute sulla Terra rivela che le condriti carbonacee, ricche di carbonio, sono molto più rare del previsto. Il motivo, secondo un gruppo di ricercatori guidato da Matthias Grott, del del Deutsches Zentrum für Luft- und Raumfahrt, è l'estrema fragilità di questi oggetti, composti da materiali grossolani e molto porosi. Solo i frammenti più grandi sarebbero quindi in grado di resistere all'ingresso nell'atmosfera terrestre.

I ricercatori, il cui studio è stato pubblicato su «Nature Astronomy», hanno analizzato i dati raccolti da uno dei rover della missione giapponese Hayabusa-2, atterrato sull'asteroide Ryugu. In particolare, grazie alle misure del radiometro MARA, che ha raccolto la radiazione infrarossa emessa dalla superficie dell'asteroide, Grott e colleghi hanno dedotto composizione e densità del materiale, arrivando alla rassicurante conclusione che la nostra atmosfera è un ottimo scudo contro questo tipo di asteroidi. (*EmRi*)

NASA/GODDARD/University Of Arizona/SPL/AGF

Un'agenda globale per salvare la sabbia

Altro che castelli: con la sabbia si costruiscono case, si fabbricano vetro e dispositivi elettronici. Ogni anno nel mondo ne consumiamo 32-50 miliardi di tonnellate, troppi per il naturale tasso di rinnovamento della risorsa, e la domanda crescerà. «Aumenterà del 300 per cento secondo le proiezioni fatte dal 2000 al 2100, e ci si aspetta un incremento del 400 per cento nel costo», spiega Mette Bendixen dell'Università del Colorado a Boulder, tra gli autori di un articolo pubblicato su «Nature» in cui i ricercatori lanciano un appello alle Nazioni Unite e all'Organizzazione mondiale del commercio lamentando l'assenza di dati e di una politica globale che regoli l'estrazione della sabbia. Il problema non è solo di disponibilità: la sabbia viene estratta illegalmente in ben 70 paesi. Gli scavi selvaggi in fiumi e spiagge nuocciono all'ambiente e minacciano la vita di tre miliardi di persone e di numerose specie in via di estinzione. In Vietnam, per esempio, il governo prevede il trasferimento di 500.000 persone che vivono nel delta del Mekong, le cui sponde stanno collassando a causa dell'estrazione della sabbia. E in India, l'erosione delle sponde del Gange ha distrutto l'habitat del coccodrillo *Gavialis gangeticus*, di cui oggi rimangono solo 200 esemplari adulti.(*MaSa*)

STORIA DELL'EVOLUZIONE

Il big bang della vita

Nuovi fossili e analisi della composizione chimica degli antichi oceani rivelano che l'esplosione del Cambriano ebbe radici sorprendentemente remote

di Rachel A. Wood

Illustrazione di Franz Anthony

IN BREVE

Per lungo tempo gli scienziati hanno creduto che gli animali complessi avessero avuto origine durante l'esplosione del Cambriano.

Ma prove fossili indicano che in realtà emersero milioni di anni prima, nel corso dell'Ediacarano.

Nuove tecniche per ricostruire la composizione chimica degli antichi oceani ci hanno dato un'idea delle pressioni ambientali che diedero il via a questa prima diversificazione evolutiva.

Rachel A. Wood è paleontologa e geologa all'Università di Edimburgo. La sua ricerca si concentra sulle origini e sulla paleoecologia delle barriere coralline e sull'evoluzione della chimica dell'acqua di mare.

Chi sale sulle ripide pareti di rocce bianche che circondano i grandi fiumi della Siberia si trova in un punto fondamentale per la storia della vita sulla Terra: il confine geologico tra il periodo Precambriano e il Cambriano, un confine che risale a 541 milioni di anni fa. Le rocce al di sotto di questa linea spartiacque contengono pochissimi resti fossili, che si limitano a pallide impronte di organismi a corpo molle e a una manciata di forme di conchiglia.

Invece aprendo una qualsiasi delle rocce appena al di sopra del confine la si scopre piena di conchiglie, e poco più in alto appaiono fossili familiari, come i trilobiti. Questi cambiamenti documentano la cosiddetta esplosione del Cambriano, uno degli eventi più significativi, seppure ancora poco compresi, di tutta l'evoluzione.

Per decenni gli scienziati hanno ritenuto che gli animali complessi (organismi multicellulari che presentano tessuti diversificati) avessero avuto origine durante l'esplosione cambriana. È vero che in quel periodo si produsse improvvisamente una profusione di nuove forme, tra le quali si contano anche gli antenati di molti dei maggiori gruppi animali di oggi, tuttavia alcune recenti scoperte in Siberia, in Namibia e in altri luoghi mostrano che in realtà gli animali complessi ebbero origine milioni di anni prima dell'esplosione cambriana, durante l'ultimo periodo del Precambriano, l'Ediacarano. Tra queste scoperte si annoverano le più antiche forme note di animali con scheletri interni e scheletri esterni composti di tessuti mineralizzati, un'innovazione evolutiva chiave che si ritrova anche in molti animali moderni.

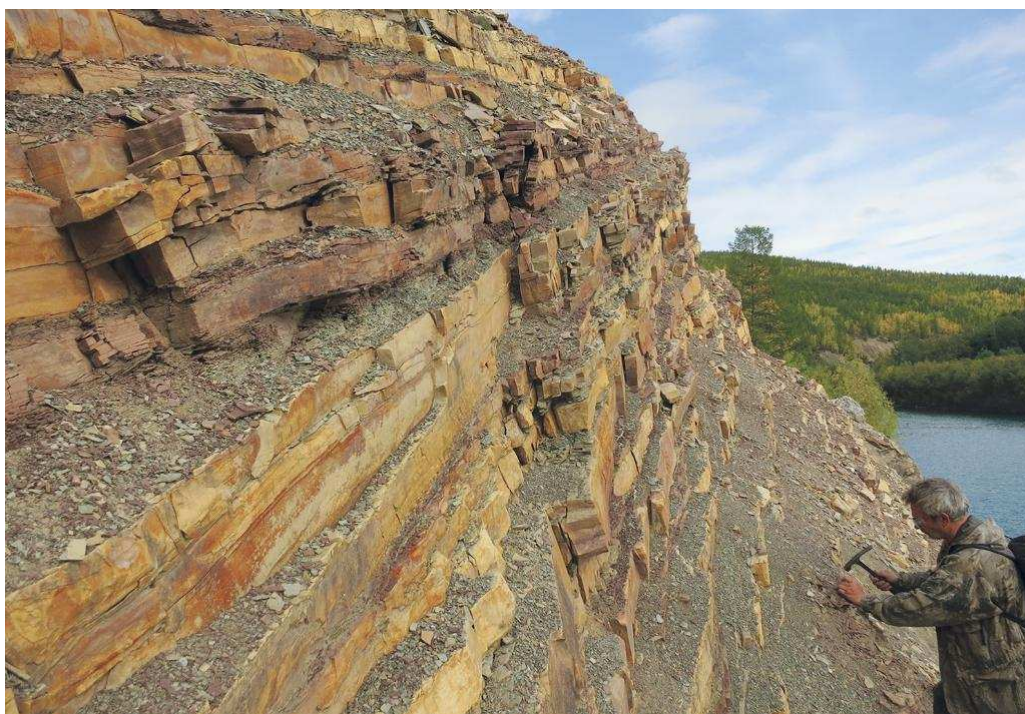
L'esistenza di questi animali corazzati in epoca così remota, 550 milioni di anni fa, indica che le pressioni ecologiche e ambientali che si riteneva avessero dato il via all'esplosione cambriana erano in realtà già attive molto tempo prima. Scoprire il modo in cui questi fattori determinarono l'evoluzione dei primi animali complessi nell'Ediacarano è fondamentale per capire la straordinaria diversificazione che sarebbe fiorita a seguire, nel Cambriano appunto.

La documentazione fossile del Cambriano è oggetto di studi intensi da oltre 150 anni, perciò il quadro globale di quando e dove apparvero i vari fossili di quel periodo è già stato chiarito in maniera abbastanza completa: animali simili comparvero in molti continenti all'incirca nello stesso periodo e seguirono la stessa successione di cambiamenti evolutivi più o meno contemporaneamente. Tuttavia è solo ora, con le scoperte dei fossili ediacariani, più antichi, che iniziamo a vedere le radici dell'esplosione del Cambriano.

Una cosa positiva è che iniziamo anche a capire perché l'esplosione cambriana si sia verificata proprio in quel momento, anche grazie allo sviluppo di nuove tecniche che hanno rivoluzionato la nostra comprensione del modo in cui la composizione chimica degli oceani cambiò durante il periodo Ediacarano-Cambriano. Le scoperte ricavate dalla documentazione fossile e geochimica sono state integrate solo di recente in una possibile descrizione del modo in cui operarono in quel periodo biosfera, geosfera, idrosfera e atmosfera del nostro pianeta, che insieme compongono quello che si chiama sistema Terra. Eppure possiamo già delineare un'immagine notevole di come il fondo dei mari si popolò di animali sempre più complessi già decine di milioni di anni prima dell'esplosione cambriana, preparando il terreno al fiorire della vita animale che conosciamo.

I primi animali

La prova più antica possibile dell'esistenza di animali in tempi remoti non proviene da fossili riconoscibili ma dai resti di composti organici chiamati biomarcatori. Alcuni ricercatori hanno trovato uno di questi biomarcatori, una forma particolare di sterano, in alcune rocce molto ben conservate provenienti da una sequenza sedimentaria chiamata supergruppo di Huqf, in Oman, che ha almeno 650 milioni di anni. Alcuni esperti sostengono che questi sterani provengano esclusivamente da un gruppo particolare di spugne e che di conseguenza la presenza di queste molecole nelle rocce di Huqf costituisca una documentazione dell'esistenza di questi animali in quell'epoca remota. Però non tutta la comunità scientifica accetta la tesi secondo cui gli sterani provengono specificamente solo da quelle spugne. Anzi, uno studio pubblicato lo scorso aprile ipotizza che siano traccia di un gruppo di forme di vita unicellulari come le amebe.

I fossili più antichi proposti come esempi di animali, che provengono da una sequenza di rocce nella Cina meridionale chiamata formazione di Lantian e che potrebbero avere addirittura 635 milioni di anni, sono a loro volta contestati. Alcuni studiosi riten-

Tracce fossili. Fossili importanti di animali complessi sono stati estratti dalle rocce del periodo Ediacarano sulle rive del fiume Judoma, in Siberia (*qui a fianco*), e ai margini del deserto di Nama, in Namibia (*sotto*).

Rachel A. Wood

gono che quelle minuscole forme a corpo molle siano imparentate con i coralli o con le meduse, perché mostrano strutture simili a tentacoli, ma le condizioni di conservazione dei fossili non sono abbastanza chiare da permettere un'interpretazione univoca, motivo per cui molti ricercatori non sono convinti che rappresentino effettivamente qualche tipo di animali.

I più antichi resti animali che mettono d'accordo quasi tutti sono fossili provenienti da Terranova, isola canadese nell'Oceano Atlantico, e che risalgono a circa 571 milioni di anni fa, cioè a poco dopo l'ultima glaciazione del tipo «Terra a palla di neve», che ricoprì gran parte del nostro pianeta con una spessa coltre di ghiaccio. Questi esempi di biota ediacarano, che sono i più antichi a noi noti, erano dominati da esseri a corpo molle che potevano raggiungere il metro di altezza o di larghezza. Alcuni avevano la forma di grandi fronde simili a piume, con steli verticali che li ancoravano al fondo marino; altri si stendevano sul fondo dell'oceano e avevano corpi grassi caratterizzati da un'architettura frattale, con segmenti ramificati che ripetevano la stessa forma a ogni scala. Tutte queste conformazioni sono utili per massimizzare la superficie esterna, il che suggerisce che questi animali assorbissero le sostanze nutritive direttamente dall'acqua circostante.

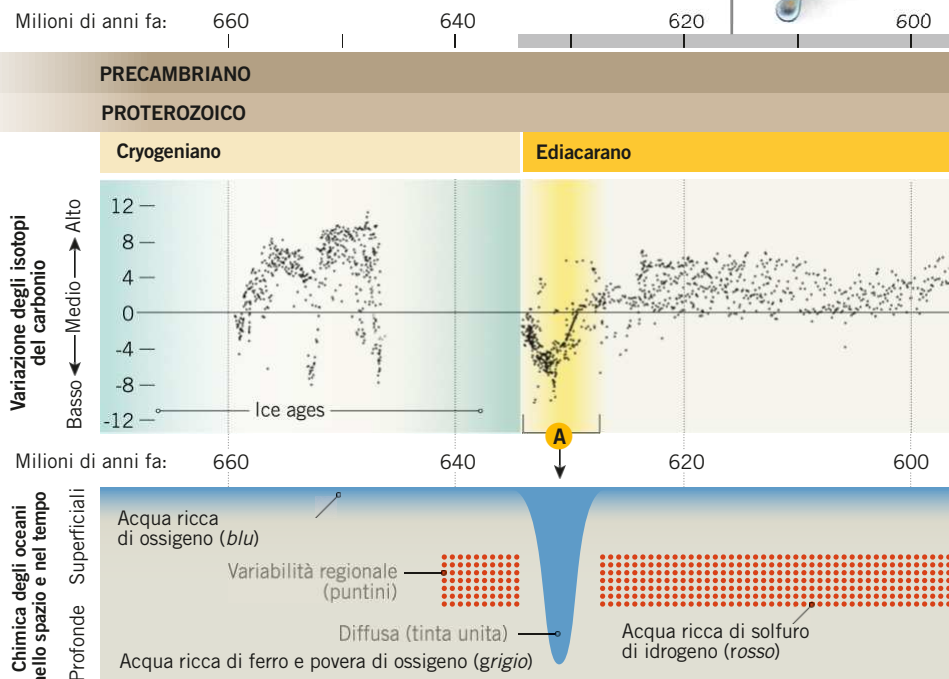
Questa modesta varietà di fauna rimase prevalente per oltre dieci milioni di anni, ma poi il tasso dell'evoluzione animale iniziò ad accelerare. La documentazione fossile indica che a partire da circa 560 milioni di anni fa il biota ediacarano iniziò a diversificarsi e a includere forme mobili che vivevano in mari poco profondi. Alcuni resti conservano segni di graffi che suggeriscono che gli animali in questione si nutrissero brucando le praterie di alghe. Altri potevano forse trascinarsi tra le alghe, assorbendo le sostanze nutritive attraverso la parte inferiore del corpo. Anche le prime semplici tane scavate appaiono più o meno nello stesso periodo, a riprova del fatto che gli animali avevano iniziato a muoversi e a perturbare i sedimenti sul fondo dei mari.

Saltiamo in avanti nel tempo a circa 550 milioni di anni fa e improvvisamente nelle rocce calcaree (composte principalmente da carbonato di calcio) appaiono i primi resti che conservano scheletri interni e scheletri esterni. Questi fossili sono già molto variegati per forma e dimensioni e si trovano in luoghi lontani tra loro come Siberia, Brasile e Namibia. La presenza in tutto il mondo e in un preciso momento di scheletri in così tanti gruppi di animali non imparentati tra loro è una testimonianza di una forza evolutiva importante che operava su scala globale. Non sappiamo ancora esattamente di che cosa si trattasse, ma abbiamo un'idea. Costruire uno scheletro è dispendioso dal punto di vista energetico, quindi se un animale intraprende un'opera del genere significa che il beneficio supera il costo. Gli animali possono costruirsi uno sche-

Prima dell'esplosione del Cambriano

Molte innovazioni importanti nell'evoluzione animale, che tradizionalmente si credeva avessero avuto origine nel Cambriano, risalgono in realtà a molto tempo prima, all'Ediacarano. Per esempio fu in questo periodo più antico che apparvero i primi animali dotati di scheletro, la cui capacità di produrre tessuti mineralizzati si sviluppò probabilmente come mezzo di protezione dai predatori. Unendo la documentazione fossile e quella geochimica del periodo che va dai 670 ai 480 milioni di anni fa si possono scoprire indizi a proposito dei fattori ambientali che guidarono questa prima attività evolutiva.

Prove geochimiche

Gli animali hanno bisogno di ossigeno per sopravvivere. La diversificazione evolutiva che ebbe luogo durante l'Ediacarano avvenne mentre i livelli di ossigeno negli oceani del mondo oscillavano in modo estremo. Gli isotopi di carbonio delle rocce ediacariane mostrano che il ciclo del carbonio era instabile e in continua evoluzione, mentre le analisi dei composti ferrosi presenti nelle stesse rocce mostrano che probabilmente durante l'Ediacarano l'ossigeno disciolto negli oceani raggiunse una soglia o una serie di soglie che permisero agli animali di diversificarsi, perché la quantità di ossigeno disponibile rispondeva al loro fabbisogno metabolico che aumentava via via che diventavano più attivi. Oggi i ricercatori ritengono che gli oceani diventarono più ricchi di ossigeno non in modo lento e graduale, ma tramite una serie di aumenti episodici (A, B, C e D) che a quanto pare coincidono con le variazioni degli isotopi di carbonio. Questo andamento si mantenne durante tutto l'Ediacarano e probabilmente anche ben oltre.

letro per molte ragioni, ma quella di gran lunga più comune è la necessità di proteggersi dai predatori. Anche se non ci sono prove fossili dell'esistenza di predatori in quell'epoca, è ragionevole credere che la comparsa degli scheletri rifletta il primo caso di diffusione di animali che si nutrivano di altri animali.

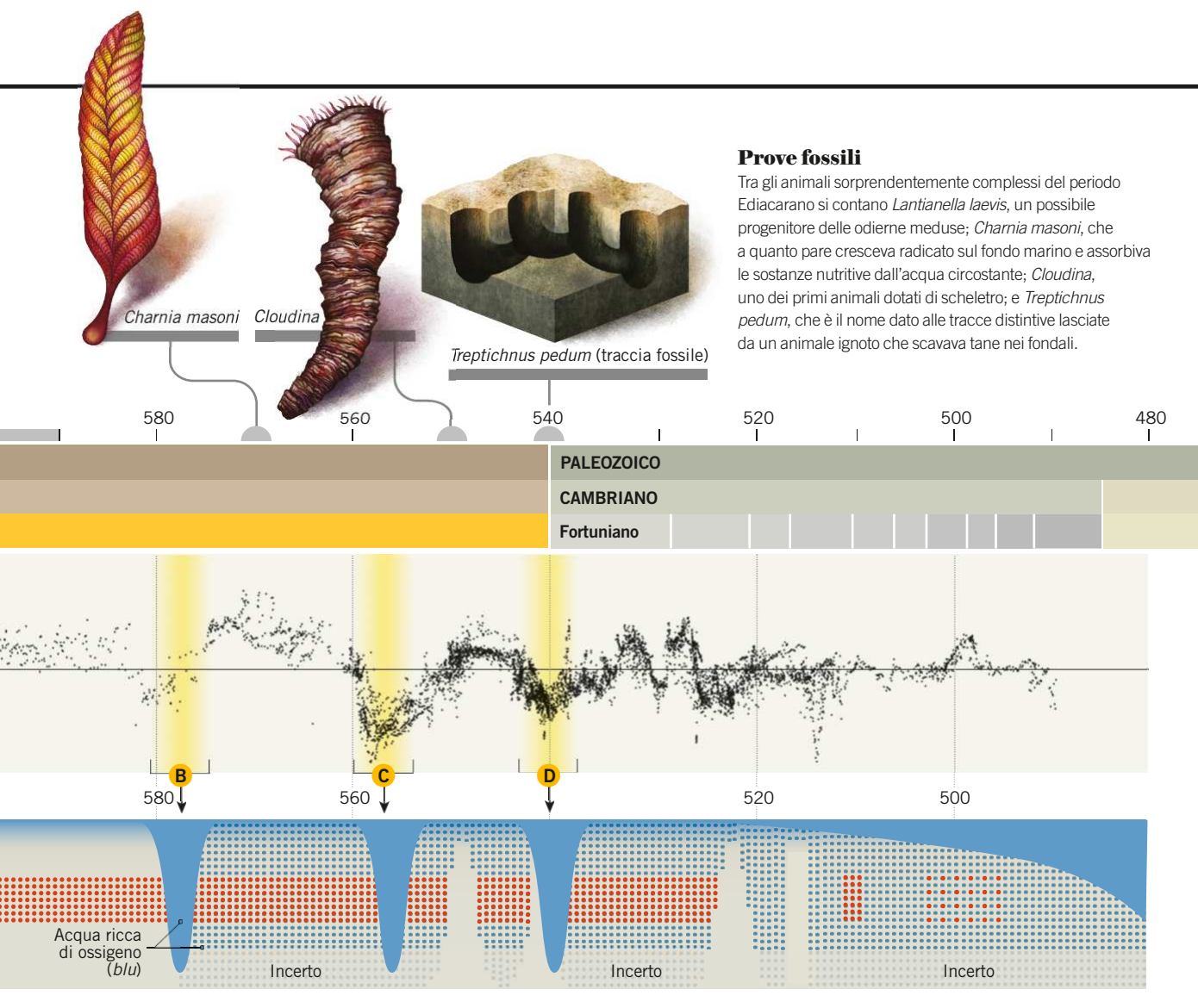
Più forti insieme

Recenti analisi di questi scheletri antichi ci hanno fornito indizi interessanti sull'aspetto degli animali in questione, e anche su come vivevano. Un organismo chiamato *Cloudina*, che conosciamo dai fossili del suo delicato scheletro tubolare che poteva raggiungere i 70 millimetri di lunghezza e somigliava a una serie di coni gelato impilati l'uno sopra l'altro, ha avuto un ruolo importante nelle ricostruzioni degli ecosistemi ediacarani. I fossili di *Cloudina* furono scoperti per la prima volta in Namibia nel 1972 e a lungo si pensò che questo organismo crescesse attaccato al fondo del mare. Negli ultimi anni, tuttavia, i ricercatori hanno identificato tanti nuovi esemplari di *Cloudina* in siti distribuiti in tutto il mondo, che hanno modificato quella teoria.

Il lavoro del mio gruppo di ricerca su esemplari provenienti dalla Namibia ha dimostrato che *Cloudina* aveva molteplici forme di crescita: poteva attaccarsi agli strati microbici legati ai sedimenti morbidi sul fondo del mare oppure ancorarsi a cumuli stratificati di cianobatteri. Cosa ancora più importante, i singoli esemplari potevano cementarsi tra loro a formare strutture simili a barriere, o *reef*. Questa scoperta ha permesso di definire *Cloudina* come uno dei più antichi esempi di animali costruttori di reef e di far risalire l'origine di questa modalità di vita animale a circa 20 milioni di anni prima di quanto si pensasse.

Non è ancora chiaro se *Cloudina* fosse imparentato con costruttori moderni di reef come i coralli, tuttavia sappiamo che, proprio come i coralli, viveva in prossimità di molti altri animali. Indizi di queste relazioni strette derivano da altri scheletri fossili trovati in rocce della stessa epoca di quelle che conservano i fossili di *Cloudina*. Sembra che uno dei partner di *Cloudina* fosse un animale chiamato *Namacalathus*, noto dai fossili scoperti in molti siti in tutto il mondo. Il suo scheletro poteva arrivare ai 50 centimetri di lunghezza ed era composto da un delicato stelo dalle pareti sottili, che sosteneva una coppa con un'apertura centrale in cima e diverse aperture ai lati. Probabilmente i tessuti morbidi si trovavano per la gran parte all'interno della coppa, anche se non si sono mai conservati. I fossili di *Namacalathus* indicano che l'animale cresceva radicandosi su strati microbici, spesso accanto a *Cloudina*.

Illustrazione di Franz Anthony (*fossili*)

Fonte: *Integrated Records of Environmental Change and Evolution Challenge the Cambrian Explosion*, Wood R. e altri, in «Nature Ecology & Evolution», Vol. 3, aprile 2019

Anche un organismo chiamato *Namapoikia*, noto solo da alcuni siti fossili in Namibia, fraternizzava con *Cloudina*. Si tratta di un animale notevole per le grandi dimensioni (raggiungeva il metro di diametro) e per lo scheletro robusto. In base alla forma, riteniamo che fosse una spugna, e che quindi avesse uno scheletro interno, contrariamente a *Cloudina* e *Namacalathus* che probabilmente erano dotati di scheletro esterno. Curiosamente, *Namapoikia* cresceva negli angoli nascosti del reef, incrostando le pareti verticali di crepe e fessure. Nelle moderne barriere coralline, le comunità di piante e animali che vivono sulle superfici aperte sono diverse da quelle che occupano aree più nascoste come grotte, interstizi o punti riparati sotto le sporgenze. Le nostre scoperte tra i fossili dell'Ediacarano indicano che questa distinzione è sempre esistita da quando ci sono reef di origine animale.

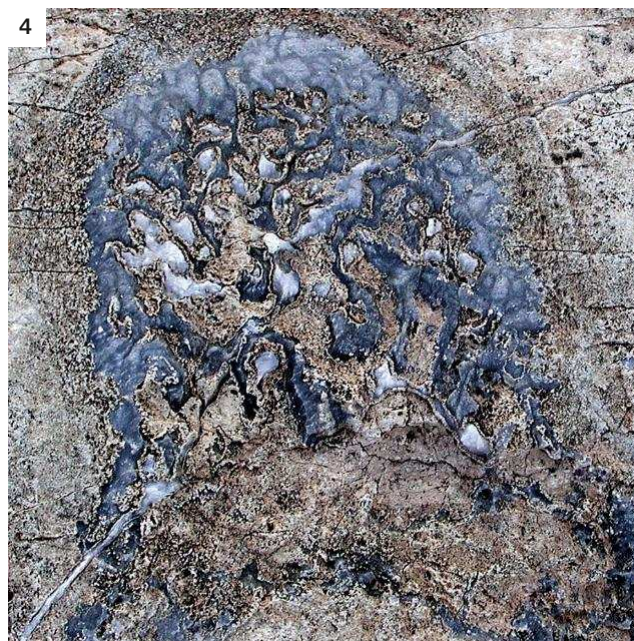
Queste osservazioni sono importanti, perché la costruzione di reef rappresenta un'innovazione notevole dal punto di vista dell'ecologia. Crescendo a stretto contatto gli uni con gli altri, o addirittura cementandosi gli uni agli altri, i singoli esemplari possono diventare più forti a livello meccanico, elevarsi al di sopra del fondo del mare per allontanarsi dai concorrenti, possono migliorare l'efficienza alimentare e proteggersi meglio dai predatori. Come i primi scheletri, dunque, anche la comparsa di reef nei reperti fossili dell'Ediacarano può indicare l'aumento di complesse pressioni ecologiche. Dunque l'esplosione del Cambriano era già iniziata, e con essa anche una vera e propria corsa alle armi tra predatore e preda.

Il mondo dell'Ediacarano

Qualche anno fa stava diventando sempre più chiaro che il Cambriano non segnò quella separazione improvvisa e drammatica dall'Ediacarano che gli esperti avevano a lungo ipotizzato. I ricercatori non avevano solo iniziato ad accumulare prove del fatto che gli animali avessero iniziato a sviluppare scheletri e a costruire reef prima di quanto si fosse pensato, ma avevano anche sviluppato modelli di ecosistema che dimostravano come le comunità animali dell'Ediacarano condividessero molti tratti ecologici con quelle del Cambriano. L'«esplosione», come stavamo scoprendo, ebbe un periodo di innesco molto più lungo di quanto avessimo riconosciuto in precedenza.

In seguito, alcune scoperte importanti in Siberia e in Cina hanno reso ancora più labile il confine tra il mondo ediacarano e quello cambriano. Un gruppo di ricerca cinese e tedesco ha scoperto che *Cloudina* continuò a esistere nel Cambriano, e il mio gruppo di ricerca, assieme a colleghi russi e cinesi, ha scoperto

Scritto sulla pietra. *Cloudina* è uno dei più antichi organismi dotati di scheletro esterno, ed è noto grazie ai resti fossili che ne conservano l'armatura delicata e tubolare (*1*). Gli esemplari di *Cloudina* potevano cementarsi tra loro a formare reef. Un altro animale antico dotato di scheletro è il *Namacalathus*, le cui parti rigide a forma di coppa di solito si conservano in grandi quantità (*2*). Gli esemplari di *Cloudina* e *Namacalathus* si ritrovano spesso assieme (*3*). *Namapoikia*, un'antica spugna, era un altro animale associato a *Cloudina*, e cresceva nelle fessure nascoste del reef (*4*).

Rachel A. Wood

in rocce del periodo Ediacarano fossili che a lungo si era creduto appartenessero esclusivamente al Cambriano. Per noi queste scoperte hanno sottolineato che per risolvere il mistero dell'esplosione cambriana dovevamo capire le dinamiche del mondo ediacarano in cui quegli animali avevano avuto origine.

Una delle dinamiche che i ricercatori sono stati particolarmente interessati a chiarire è il ruolo che possono aver avuto i cambiamenti della disponibilità di ossigeno. Gli animali hanno bisogno di ossigeno, quindi negli ultimi anni un dibattito importante ha cercato di capire se in qualche momento dell'Ediacarano e del Cambriano i livelli di ossigeno siano saliti oltre una certa soglia critica, permettendo così agli animali di prosperare. La questione è più complessa di quanto possa sembrare, perché non tutti gli animali hanno bisogno della stessa quantità di ossigeno: organismi semplici e immobili come le spugne richiedono meno ossigeno rispetto agli animali mobili, e sicuramente ne richiedono meno dei predatori attivi che nuotano veloci. Abbiamo tenuto a mente questi fattori nel corso delle nostre ricerche.

Per nostra fortuna negli ultimi anni sono stati sviluppati molti metodi geochimici per stimare quanto ossigeno ci fosse negli ocea-

ni antichi. Una tecnica particolarmente potente, la speciazione del ferro, sfrutta le caratteristiche dei diversi composti ferrosi, che si comportano in modo diverso a seconda della presenza o dell'assenza di ossigeno. Questo metodo ci permette di verificare localmente dove e quando ci fosse abbastanza ossigeno da sostenere la vita complessa. Gli studi con questa tecnica hanno ottenuto ampio consenso: probabilmente nel corso dell'Ediacarano l'ossigeno disciolto negli oceani raggiunse una soglia, o una serie di soglie, che permetteva agli animali di diversificarsi, perché la quantità di ossigeno disponibile rispondeva al loro fabbisogno metabolico, che aumentava via via che diventavano più mobili e attivi.

Oggi gli scienziati hanno a disposizione insiemi di dati geochimici abbastanza grandi da poter ricostruire la distribuzione dell'ossigeno non solo nei singoli siti ediacarani in determinati momenti, ma a livello globale e nel tempo. Questo lavoro rivela che la distribuzione durante tutto l'Ediacarano e la prima parte del Cambriano era molto diversa da quella odierna: molte zone avevano uno strato superficiale relativamente sottile di acqua ricca di ossigeno al di sopra di uno strato più spesso di acque profonde che probabilmente ne erano del tutto prive, in uno stato definito anossia.

Resta ancora da scoprire come la vita abbia reagito a oscillazioni nella disponibilità di ossigeno in tempi evolutivi

Questi dati geochimici mostrano anche che il confine tra le acque anossiche e quelle dove l'ossigeno era presente rimase molto mobile per tutto il periodo, alzandosi e abbassandosi insieme al livello dei mari. I fondali marini poco profondi e abitabili per i primi animali, quindi, erano ancora più limitati di quanto i ricercatori si aspettassero; erano vere e proprie oasi isolate di acqua ricca di ossigeno. Se la diversificazione evolutiva che avvenne nell'Ediacarano e nel Cambriano si realizzò con livelli di ossigeno piuttosto bassi ma in condizioni molto dinamiche che oscillavano su scala ecologica, globale ed evolutiva, qual è stato il ruolo di questi fattori nel plasmare quella straordinaria irradiazione?

Motore di innovazione?

I periodi di maggiore anossia sul fondo dei mari coincidono con alcune estinzioni di massa già note, come quella che segnò il Permiano 252 milioni di anni fa e annientò oltre il 90 per cento di tutte le specie marine. Tuttavia, diverse fasi di grande diversificazione (incluse quelle dell'Ediacarano-Cambriano, quella dell'Ordoviciano 100 milioni di anni dopo e quella del medio-tardo Triassico circa 247 milioni di anni fa) iniziarono durante lunghi periodi di movimentata anossia nelle acque marine poco profonde. Considerando questi eventi, il mio collega Doug Erwin della Smithsonian Institution e io abbiamo ipotizzato che l'oscillazione nella disponibilità di ossigeno possa aver creato importanti opportunità per l'innovazione evolutiva negli animali a corpo molle.

Per gli animali è molto più facile costruire uno scheletro di calcare (il materiale che forma scheletri e conchiglie di molti animali marini moderni) quando il livello di ossigeno nell'acqua supera le dieci micromoli per litro. Forse gli animali a corpo molle poterono costruire questi scheletri di carbonato di calcio solo quando i livelli di ossigeno superarono la soglia appena citata, permettendo a quelle che prima erano oasi isolate di espandersi, collegarsi tra loro e raggiungere una stabilità su scala globale.

Rimane ancora molto da scoprire su come la vita abbia reagito ai cambiamenti nella disponibilità di ossigeno su archi di tempo rilevanti per l'evoluzione. Probabilmente la reazione fu complicata perché gli animali stavano affrontando anche altri fattori, come la comparsa dei predatori, e perché anche i *feedback*, in gran parte ignoti, tra singoli organismi, ecosistemi e il sistema Terra nel suo insieme dovevano far parte dell'equazione.

Abbiamo ancora tanto lavoro da fare. Cambiamenti drastici nei processi locali che diedero forma alla crosta terrestre per tutto il periodo Ediacarano-Cambriano hanno fatto sì che siano rimaste molte lacune significative nella documentazione fossile e in quella geologica. Ciò significa che dobbiamo ricostruire la storia della nascita degli animali complessi partendo da dati raccolti da una moltitudine di località in tutto il mondo. A renderci le cose ancora più difficili c'è il fatto che molte zone chiave per l'Ediacarano sono datate in modo ancora insufficiente.

Di solito per datare le rocce di quel periodo si misura il rapporto uranio-piombo negli zirconi trovati nei vicini strati di ceneri derivate da antiche eruzioni vulcaniche. È uno dei pochi metodi che possono restituire l'età radiometrica assoluta di una roccia. Purtroppo però in molte delle successioni più note non si trovano questi importantissimi strati di ceneri, quindi non è possibile correlare in modo accurato i cambiamenti evolutivi avvenuti nelle diverse parti del mondo, cosa essenziale per creare un quadro temporale solido per la successione degli eventi che vogliamo descrivere. Un esempio eccellente è la formazione di Lantian, in Cina, molto contestata, da cui sono stati tratti i più antichi fossili che potrebbero essere di animali, ma che cronologicamente potrebbe collocarsi in qualsiasi momento tra i 635 e i 590 milioni di anni fa.

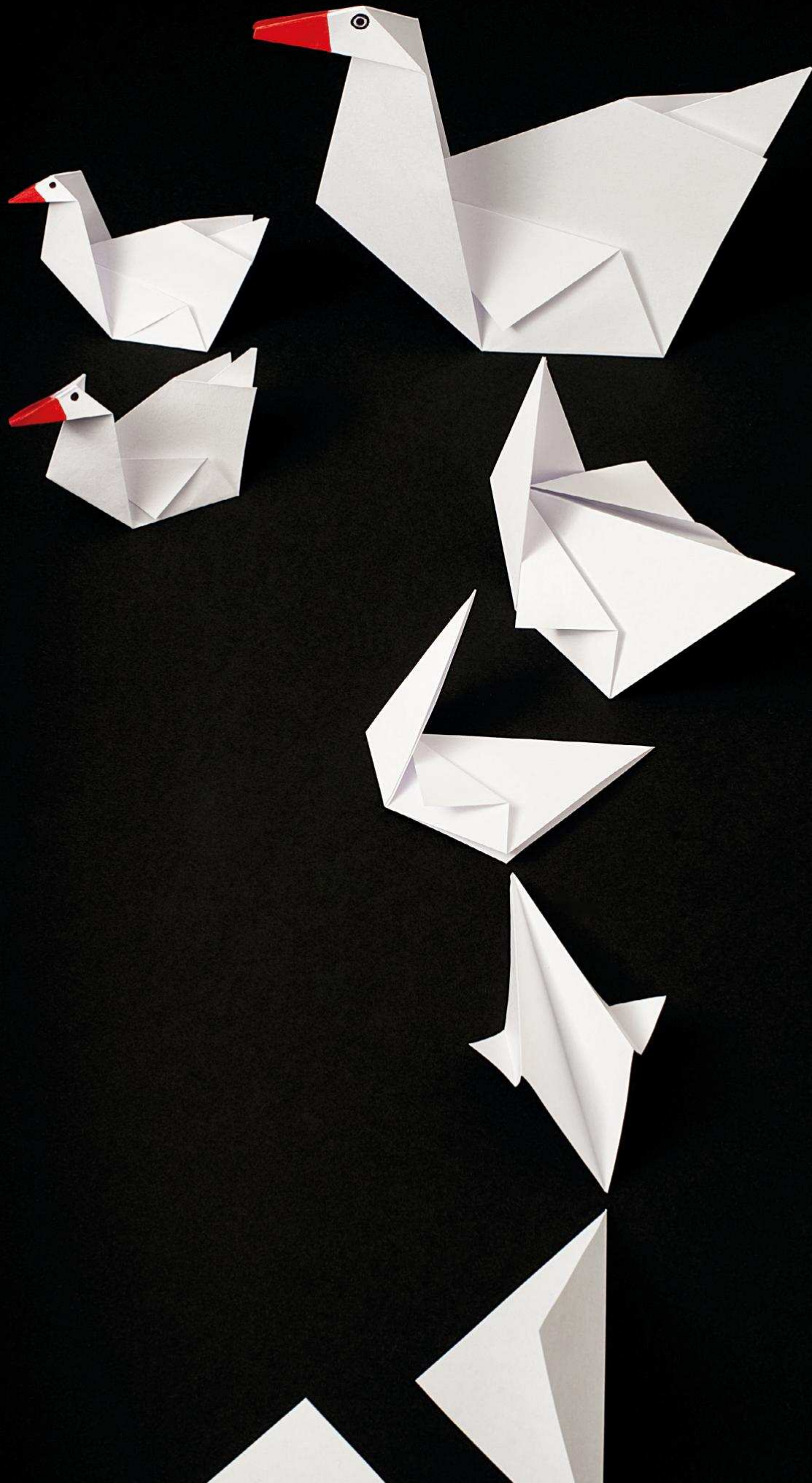
Comunque sia, possiamo essere ottimisti. La scienza continua a scoprire nuovi strati di ceneri e a perfezionare i metodi di datazione. Per esempio, recentemente è stata corretta la datazione degli strati di ceneri usati da molti gruppi di ricerca per calcolare l'età dei fossili ediacarani scoperti in Namibia e si è dimostrato che quelli più recenti, cioè più vicini al limite tra Precambriano e Cambriano, hanno oltre 2 milioni di anni in meno di quanto si pensasse in precedenza. Questo risultato solleva domande importanti sul modo in cui questi fossili vadano considerati in rapporto a quelli scoperti a Terranova, in Siberia e in altri siti chiave. Inoltre i geochimici stanno sviluppando nuove tecniche isotopiche e altri metodi che possono perfezionare la nostra conoscenza dei livelli di ossigeno nel mondo antico. Il mio gruppo e anche altri, poi, stanno scoprendo nuovi fossili in località remote che finora erano rimaste quasi inesplorate, come la Siberia. In un futuro non troppo distante, chi salirà su quelle pareti rocciose e guarderà l'ampia foresta sottostante potrà avere una comprensione migliore di quell'epoca così straordinaria. ■

PER APPROFONDIRE

Low-Oxygen Waters Limited Habitable Space for Early Animals. Tostevin R. e altri, in «Nature Communications», Vol. 7, articolo n. 12818, 23 settembre 2016.

A Deep Root for the Cambrian Explosion: Implications of New Bio- and Chemostratigraphy from the Siberian Platform. Zhu M. e altri, in «Geology», Vol. 45, n. 5, pp. 459-462, 1° maggio 2017.

Integrated Records of Environmental Change and Evolution Challenge the Cambrian Explosion. Wood, R. e altri, in «Nature Ecology & Evolution», Vol. 3, pp. 528-538, aprile 2019.

Il big bang dell'evoluzione animale. Levinton J.S., in «Le Scienze» n. 293, gennaio 1993.

EVOLUZIONE

Tutti gli animali del mondo

Durante l'esplosione del Cambriano e nelle epoche successive l'evoluzione ha esplorato lo spazio delle forme animali senza però esaurirlo

di Telmo Pievani

IN BREVE

Da un secolo e mezzo ormai, gli evoluzionisti dibattono sulla diversificazione delle forme animali.
Secondo alcuni, la disparità, cioè la differenza tra piani corporei, si è tutta evoluta mezzo miliardo di anni fa nell'esplosione del Cambriano; da quella disparità derivano gli animali che abitano la Terra oggi. Per altri, gli animali esplorarono gradualmente forme possibili anche nelle epoche geologiche successive.

Uno studio recente ha mostrato che lo spazio delle forme animali possibili (chiamato anche morfospazio) fu esplorato per una sua parte rapidamente all'inizio dell'evoluzione dei metazoi nel Cambriano; per un'altra parte fu raggiunto gradualmente nel corso della storia naturale successiva.
Il morfospazio tuttavia non sarebbe stato esplorato in modo omogeneo dall'evoluzione.

Margherita del Piano

Telmo Pievani è professore ordinario di filosofia delle scienze biologiche all'Università degli Studi di Padova.

Gli organismi pluricellulari, dotati di tessuti e organi diversi, comparvero molto tardi nella storia della vita, non prima di 600 milioni di anni fa, cioè dopo ben tre sterminati miliardi di anni di apparente monotonia unicellulare. Come mai? La diversificazione delle forme animali è un problema che angustia gli evoluzionisti da un secolo e mezzo.

Il giallo scientifico si può sintetizzare in tre interrogativi connessi fra loro: perché la comparsa tardiva degli animali si staglia così repentinamente nella documentazione fossile? Perché gli organismi delle prime faune, già ben strutturati anatomicamente e con una notevole complessità di relazioni ecologiche fra loro, non sembrano all'apparenza avere antenati comuni diretti, prevedibilmente più semplici, in ritrovamenti più antichi? E infine, perché dall'esplosione di forme di vita animale del Cambriano (il periodo geologico che va da 542 a 488 milioni di anni fa) fino a oggi non si nota, tranne poche eccezioni, la comparsa di nuovi piani corporei fondamentali?

I piani corporei, detti classicamente *body plan*, sono insiemi di caratteristiche strutturali di base (simmetrie del corpo, segmenti, arti, appendici e così via) che definiscono un gruppo di animali che hanno avuto un antenato comune. Per esempio il piano corporeo di tutti gli artropodi (che include tra gli altri insetti, crostacei, trilobiti e aracnidi) prevede che siano invertebrati dotati di un esoscheletro, di un corpo diviso in segmenti e di appendici articolate e a coppie.

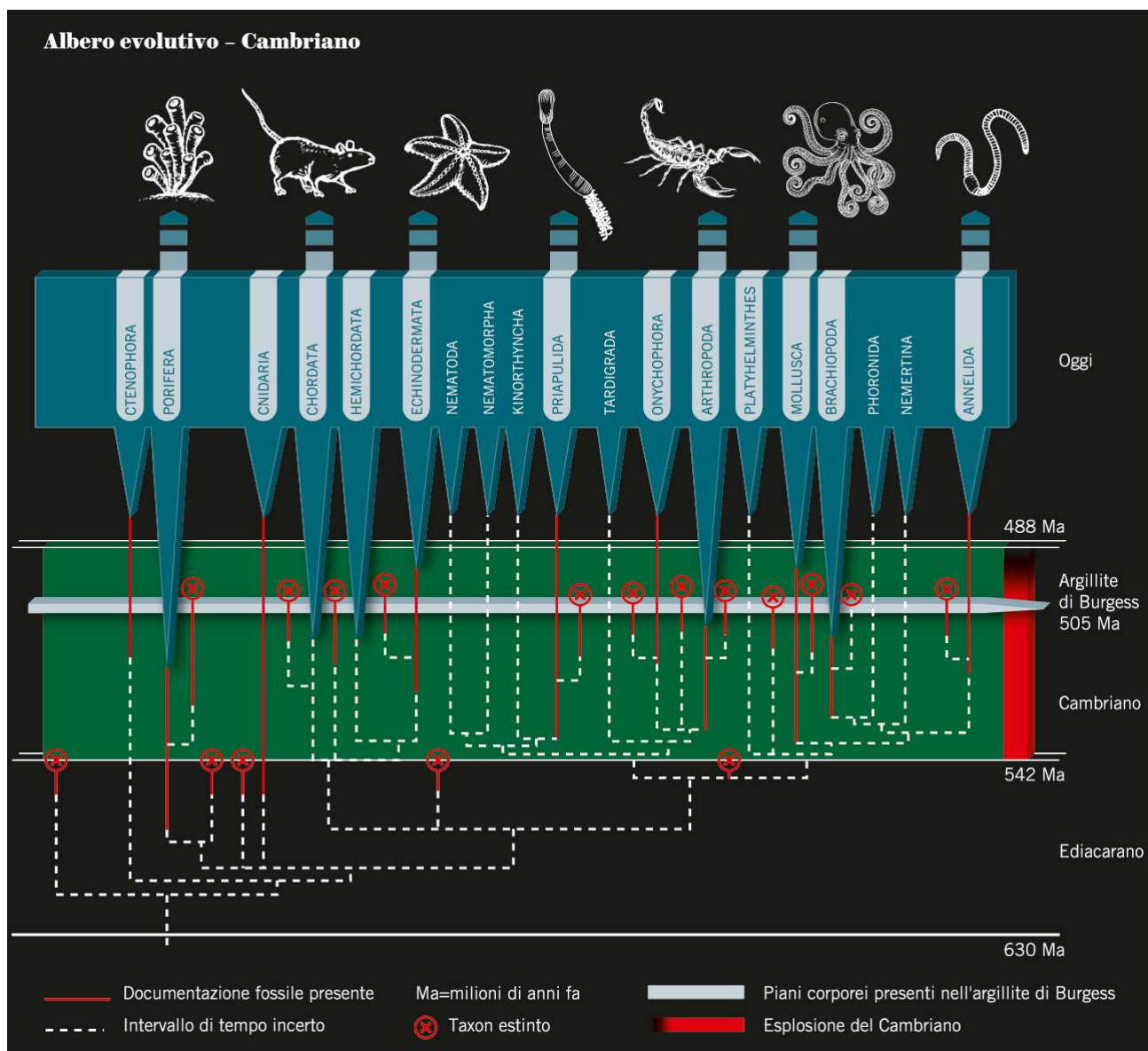
L'enigma del Cambriano

Nel 1854 il grande geologo Roderick I. Murchison diede dell'enigma cambriano una spiegazione semplice e confortante: i pluricellulari dei primordi (a quel tempo le prime testimonianze in assoluto di vita complessa sulla Terra, il presunto inizio di tutto) non potevano che essere l'oggetto stesso della creazione divina e quei body plan rappresentavano i modelli già ben progettati per lo sviluppo delle forme di vita successive.

Cinque anni dopo Charles Darwin, nel suo *L'origine delle specie*, citò l'ipotesi di Murchison e negò che il Cambriano potesse essere il periodo di nascita della vita in sé. L'argomentazione darwiniana, anche in questo caso, portò la discussione nell'alveo della scienza: la vita del pre-Cambriano doveva essere costituita da animali più semplici, predecessori di quelli rinvenuti, e la nostra ignoranza su questa epoca di «vita invisibile» era da imputare all'imperfezione dei dati paleontologici, in particolare all'inesistenza di tracce relative alle parti molli degli organismi più antichi. Da qui l'idea di chiamare «Fanerozoico», cioè era della vita visibile, l'eone cominciato appunto 542 milioni di anni fa.

In altre parole, Darwin pensò che l'esplosione iniziale di forme animali fosse un artefatto della documentazione, una sorta di «illusione ottica» dei paleontologi, e che il Cambriano fosse semmai l'inizio della vita fossilizzabile, con parti dure e conchiglie, non della vita in quanto tale. Quindi non un'esplosione di specie animali, ma di tracce fossili. Aveva ragione: oggi sappiamo che i primi esseri viventi, forme di vita unicellulari, nacquero già 3,75 miliardi di anni fa; che ben prima del Cambriano si erano evolute primordiali colonie di organismi unicellulari; e che nelle ultime fasi del pre-Cambriano si erano già consumate altre esplosioni di forme animali, come la complessa fauna pluricellulare di Ediacara con le sue forme appiattite divise in sezioni (vissuta approssimativamente tra 579, ma forse anche prima, e 542 milioni di anni fa), la fauna tommotiana (piccole parti dure di animali non ben identificati, somiglianti a trilobiti cambriani, a coralli e spugne, risalenti a 548-500 milioni di anni fa) e la fauna di Lantian (3000 fossili descritti su «Nature» nel 2011 e risalenti a quasi 600 milioni di anni fa, con alghe marine e invertebrati di 15 specie diverse e tassonomicamente distinte da quelle successive).

Restava tuttavia il fatto che non erano per nulla chiare le relazioni di discendenza tra queste prime diversificazioni di forme e quella assai più incisiva e stabile di inizio Cambriano. Tutti gli animali che oggi abitano la Terra, con l'eccezione forse soltanto di spugne e cnidari (meduse e polipi corallini), derivano dall'esplosione del Cambriano. Inoltre la *disparità* di forme, cioè le differenze di grana grossa tra i piani corporei (in termini di complessità, struttura, dimensioni), pare sia stata esplorata tutta o in gran parte all'inizio. Dopo il botto di partenza, l'evoluzione sembra aver lavorato più che altro su quella che chiamiamo *diversità*, cioè solo sulle differenze di grana fine all'interno dei piani strutturali principali già formati, ovvero all'interno dei body plan che caratterizzano i *phyla* animali (il *phylum* è il gruppo tassonomico gerarchicamente elevato che sta appena sotto il regno; i *phyla* del regno animale corrispondono ai piani strutturali principali dei corpi degli animali).

Quindi, accadde tutto subito e poi vi furono solo variazioni sul tema? Per un gradualista come Darwin era difficile ammetterlo. Nel decimo capitolo dell'ultima edizione di *L'origine delle specie*, nel 1872, affrontò di petto il mistero del Cambriano avanzando una delle sue famose predizioni rischiose: «Se molte specie, appartenenti agli stessi generi o alle stesse famiglie, fossero realmente apparse improvvisamente, questo fatto sarebbe fatale alla teoria dell'evoluzione per selezione naturale… Il problema è attualmen-

Origine e diversificazione degli animali durante l'esplosione del Cambriano. Le strutture coniche rappresentano origine e diversificazione approssimate dei *phyla* moderni. Il piano corporeo di base dei più importanti gruppi di animali era già evoluto al tempo della Burgess Shale.

Danilo Sossi (*basato su illustrazioni originali del Royal Ontario Museum*)

te insolubile e può essere un valido argomento contro le opinioni qui esposte».

Le forme precedenti ipotizzate da Darwin in effetti le abbiamo trovate, ma non siamo sicuri che siano le antenate, perché troppo diverse. Nel luglio 2010 è stata annunciata su «Nature» la scoperta in Gabon, nel bacino di Franceville (poi confermata nel 2019 da altri ritrovamenti), di organismi all'apparenza pluricellulari e datati addirittura 2,1 miliardi di anni fa: si tratta probabilmente di colonie di organismi unicellulari, con una crescita coordinata, simili alle amebe coloniali odierne, adattati ad ambienti costieri ricchi di ossigeno. Poco dopo, 2 miliardi di anni fa, sporadicamente compare l'enigmatica *Grypania spiralis*, forse un'altra colonia di eucarioti a forma tubolare (gli eucarioti sono organismi unicellulari o pluricellulari costituiti da cellule con nucleo delimitato da una membrana e al cui interno si trova il DNA), o forse un batterio o alga gigante.

Ma il vero problema sono le forme successive. Nel 1989 il paleontologo Stephen J. Gould, nel suo libro *La vita meravigliosa*, un capolavoro riconosciuto di prosa scientifica, contestò i tentativi di inquadrare forzatamente gli animali del Cambriano nei *phyla* odierni e propose un'ipotesi radicale secondo cui l'evoluzione della disparità animale era da ricondursi a un modello in tre fasi: sperimentazione esplosiva iniziale nel primo Cambriano e formazione rapida non solo di tutta la disparità attuale (esclusi a suo avviso soltanto i briozoi, piccoli invertebrati acquatici, di forma ramificata, coloniali e sessili, quelli per intenderci che incrostano le carene delle navi), ma anche di molta disparità in più; decimazione successiva di gran parte dei body plan di partenza; lunga crescita della diversità di classi, ordini, famiglie e generi (tutti gruppi tassonomici gerarchicamente inferiori ai *phyla*), ma solo all'interno dei pochi piani strutturali sopravvissuti.

Tra il 2008 e il 2009 alcuni studi hanno confermato che anche

la fauna di Ediacara potrebbe essersi evoluta in tre fasi simili, con esplosione iniziale di disparità, poi variazioni sui temi e quindi declino finale.

Trent'anni dopo, il modello per sperimentazione e decimazione di Gould presenta due problemi: non sono state riscontrate tracce di un'estinzione drammatica dei body plan nel periodo successivo al Cambriano, cioè l'Ordoviciano, e molti animali bizzarri di quelle ancestrali faune marine (come le creature che hanno lasciato traccia fossile persino delle loro parti molli a Burgess Shale, sulle Montagne Rocciose canadesi) sono stati poi riconosciuti dai paleontologi come proto-antenati o evoluzioni collaterali precoci dei raggruppamenti attuali (soprattutto proto-artropodi, onicofori, anellidi, molluschi, echinodermi, vermi priapulidi, e protocordati). In particolare, si pensa che molte di quelle forme siano *stem group*: cioè organismi estinti che presentano caratteristiche simili a quelle di specie appartenenti a gruppi monofiletici attuali (*crown groups*, cioè insiemi di specie che includono tutti e soli i discendenti di un antenato comune), ma non discendono dal loro stesso antenato comune, perché sono più antichi. Per intenderci, sono come nostri vecchissimi prozii che non hanno avuto discendenti (*si veda l'illustrazione in alto nella pagina a fronte*).

Nessuno mette in dubbio che nei bassi oceani cambriani la nascita delle forme animali sia stata assai creativa

Nessuno però mette più in dubbio che nei bassi fondali degli oceani cambriani sia successo qualcosa di unico e che la nascita delle forme animali sia stata furiosamente creativa. Fu un periodo di eccezionale sperimentazione evolutiva e di grande flessibilità strutturale. Ma allora la disparità si è evoluta davvero tutta in un botto all'inizio – come pensano illustri paleobiologi come James W. Valentine, dell'Università della California a Berkeley, e Douglas Erwin, dello Smithsonian National Museum of Natural History – oppure gli animali esplorarono gradualmente le forme possibili nel corso delle epoche geologiche successive? È quanto si è chiesto un gruppo di paleontologi e biologi della University of West Georgia, del Dartmouth College di Hanover, in New Hampshire, dell'Università di Bristol e dell'Università di Bath, giungendo a conclusioni inedite molto interessanti, recentemente pubblicate sui «Proceedings of the National Academy of Sciences».

La grande mappa del morfospazio

Innanzitutto, come facciamo a misurare la disparità di piani corporei in animali vissuti così tanto tempo fa e soprattutto così diversi da noi? Molti caratteri cruciali per valutare le differenze nelle strutture corporee, per esempio, fanno parte dei tessuti molli, e non lasciano tracce fossili. Secondo Philip Donoghue dell'Università di Bristol e gli altri autori dello studio, fare affidamento solo sui raggruppamenti attuali degli animali (classificati dal naturalista svedese Linneo nel XVIII secolo), e su misurazioni quantitative e comparative delle forme degli animali (cioè su analisi «morfometriche») basate quasi esclusivamente sui caratteri scheletrici che fossilizzano, ha portato i sostenitori della massima disparità iniziale come Gould (*si veda l'illustrazione in basso nella pagina a fronte*) ad approssimazioni per eccesso troppo imprudenti. Avrebbero cioè esagerato l'esplosiva disparità degli animali del Cambriano.

Le analisi proposte fin qui funzionano abbastanza se confrontiamo tra loro i livelli tassonomici bassi, cioè quelli che stanno gerarchicamente sotto, o per meglio dire «dentro», i *phyla*: classi, ordini, famiglie, generi e infine specie (in ordine gerarchico discendente). Quando però confrontiamo tra loro *phyla* e regni diversi, cioè i livelli tassonomici alti che rendono conto della disparità tra piani corporei (per Linneo i regni erano solo due, piante e animali, oggi ne contiamo almeno sei: batteri, archeobatteri, protozoi, funghi, piante e animali, escludendo i virus) dobbiamo ricorrere a metodi più sistematici e quantitativi. Bisogna cioè costruire un *morfospazio* globale, cioè uno spazio matematico delle forme corporee che rappresenti adeguatamente la disparità nel regno degli animali, o metazoi, attuali e passati.

Gli autori hanno quindi completato una prima grande mappatura dei caratteri che misurano la disparità di piani corporei degli animali attualmente esistenti sulla Terra: 1800 caratteri, alcuni tipici dei taxa considerati (cioè le unità tassonomiche di vario livello, in questo caso classi e ordini) e altri condivisi tra più taxa; caratteri rappresentativi di tutti gli aspetti della morfologia, dal livello cellulare a quello dello sviluppo, a quello sessuale, delle anatomie scheletriche e delle parti molli. La mappa o matrice dei caratteri è stata poi applicata ai principali gruppi di animali esistenti, ovvero su 212 taxa distribuiti per 34 *phyla*, con relativi confronti e calcolo delle distanze tra i taxa.

In pratica hanno passato al setaccio tutti i piani corporei animali fondamentali, tra gli altri: anellidi, artropodi, brachiopodi, cordati (il cui sotto-*phylum* dei vertebrati include pesci, anfibi, rettili, uccelli e noi mammiferi), celenterati, ctenofori, echinodermi, molluschi, rotiferi, tardigradi, onicofori, nematodi e vari altri *phyla* di vermi.

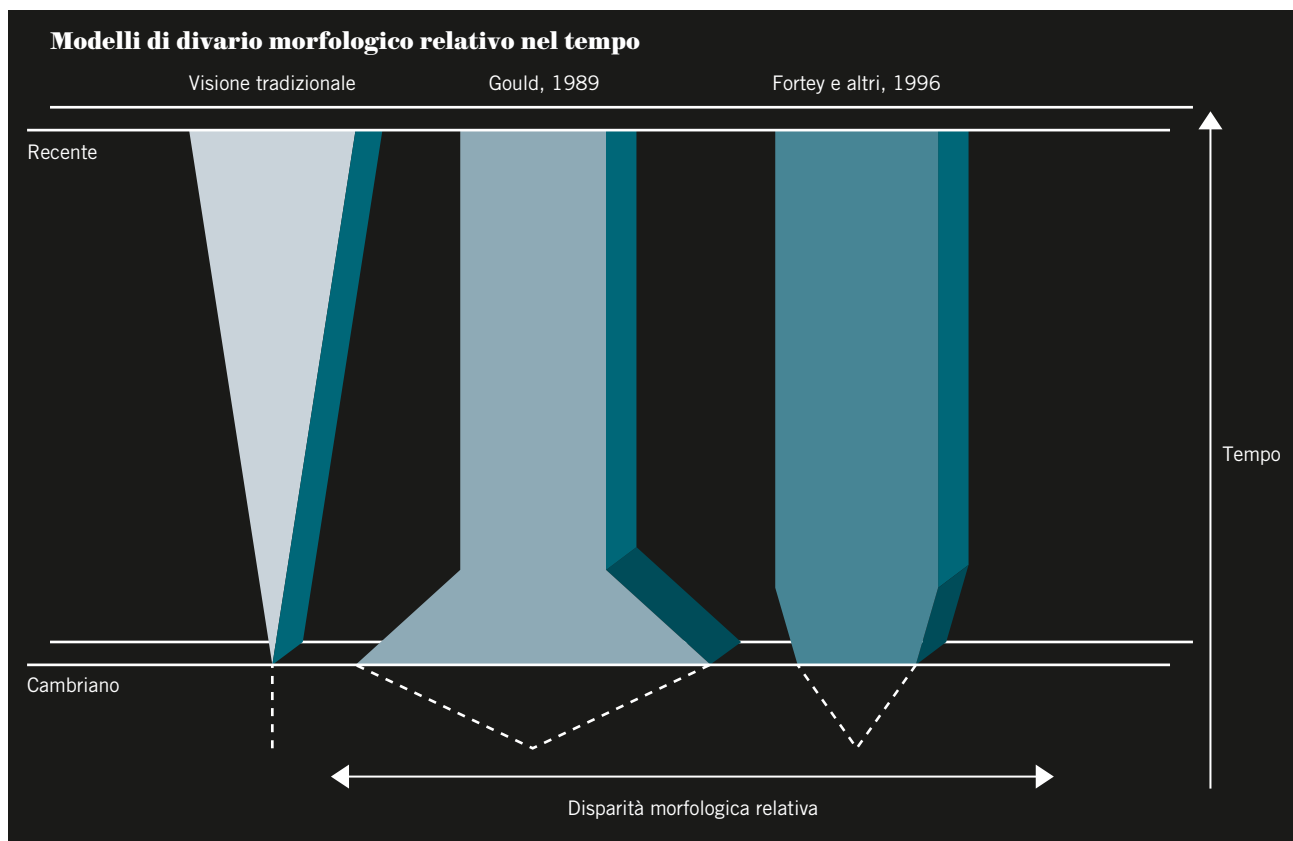
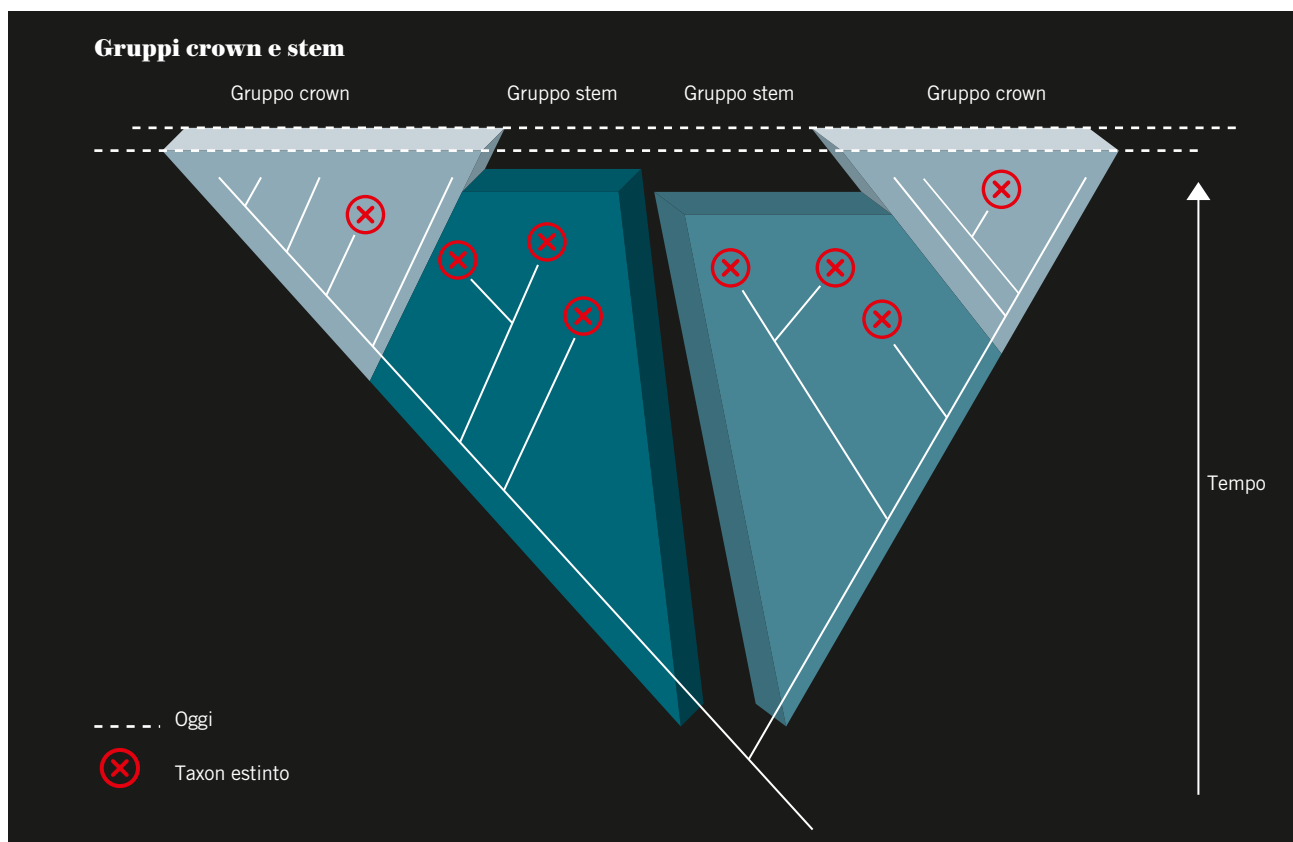
Come gruppi di controllo sono stati usati due *phyla* ritenuti molto primitivi, cioè separatisi agli inizi della diversificazione degli animali: i poriferi (le spugne) e i placozoi (esserini marini simili ad amebe). La mappa delle relazioni tra i caratteri ha quindi misurato sia la disparità interna a ciascuno dei *phyla* sia la disparità tra i *phyla*. Si scopre così che il morfospazio risultante è dominato da cinque *phyla* con alta disparità: gli artropodi (il vastissimo *phylum* di invertebrati che include tra gli altri insetti, crostacei, aracnidi, miriapodi, gli estinti trilobiti), gli anellidi (come lombrichi e sanguisughe), gli echinodermi (come stelle marine e ricci di mare), i molluschi (come cefalopodi, bivalvi e gasteropodi) e i cordati come noi.

Fin qui, gli animali esistenti. Il gioco si è fatto ancora più interessante quando gli autori hanno aggiunto la stessa analisi per 70 taxa fossili del primo Cambriano, con 111 caratteri esclusivi. La metà di questi però non erano conservati abbastanza nella documentazione fossile: sono stati quindi esclusi e sostituiti in alcuni casi con inferenze su come doveva essere quel carattere in base alle relazioni filogenetiche dell'animale, cioè andando a guardare com'era quel carattere in specie affini, cugine o discendenti. Non era mai stato effettuato un lavoro così certosino e su larga scala.

Sovrapponendo a questo punto il morfospazio degli animali attuali con quello fossile, si scoprono indizi rivelatori. Anche se era stata sovrastimata, per la maggioranza dei *phyla* animali la massima disparità era in effetti già presente nel Cambriano, a conferma dell'ipotesi di Gould, Erwin e Valentine. Tuttavia i gruppi di maggiore successo – cioè artropodi, cordati e in misura minore anellidi, echinodermi e molluschi – mostrano una progressiva e consistente esplorazione del morfospazio anche dopo il Cambriano. Quindi il calcolo totale dice che la disparità complessiva degli animali è comunque cresciuta nell'ultimo mezzo miliardo di anni,

Gruppi crown e stem

Gruppo crown
Gruppo stem
Gruppo stem
Gruppo crown
Tempo
Oggi
Taxon estinto

Danilo Sossi (*basato su illustrazioni originali del Royal Ontario Museum*)

Nell'illustrazione in alto, la differenza tra gruppi corona e gruppi stelo. In basso, le teorie differenti sulla disparità morfologica relativa, le differenze tra i piani corporei, nel tempo: secondo Stephen J. Gould, nel Cambriano si è verificata una sperimentazione esplosiva seguita da una decimazione.

e non diminuita, come nel modello sperimentazione-decimazione di Gould.

Non è del tutto vero quindi che, a causa di canalizzazioni dovute ai *network* di regolazione genica che fissano i vincoli di sviluppo dei piani corporei, non vi fu alcuna innovazione fondamentale, in termini di disparità, dopo le faune cambriane tipo quella di Burgess Shale. I confini della disparità si espansero un po' anche dopo. Le convergenze evolutive (quando animali non strettamente imparentati sviluppano adattamenti analoghi a causa di pressioni ambientali simili) portarono alcuni *phyla* a sovrapporsi ad altri, cioè a esplorare le stesse soluzioni anatomiche per ragioni funzionali simili. Nel tardo Devoniano poi (tra 390 e 360 milioni di anni fa), gli adattamenti alla terraferma – prima di piante e insetti, poi dei tetrapodi, cioè dei vertebrati con quattro arti come noi – furono un potente motore di ulteriore disparità, soprattutto in anfibi, rettili, uccelli e mammiferi.

Non si pensi però che questa crescita della disparità possa far tornare in auge la vecchia idea del progresso evolutivo. La storia naturale degli animali non procede necessariamente dal primitivo al complesso (all'inizio, per esempio, vi fu un'esuberanza di sperimentazioni strutturali), né da abbozzi di adattamenti a ottimizzazioni funzionali (in faune come quelle di Burgess vediamo già all'opera specializzazioni legate all'evoluzione della vista e della predazione), né da poche ramificazioni di base a fronde intricate di derivazioni evolutive (la differenziazione morfologica era notevole già all'inizio). L'evoluzione non è una marcia di progresso, è un'esplorazione di possibilità.

La storia naturale degli animali non procede necessariamente dal primitivo al complesso

Le lacune del morfospazio

Lo spazio delle forme animali possibili fu dunque esplorato, per una sua parte, rapidamente all'inizio dell'evoluzione dei metazoi nel Cambriano, mentre per un'altra parte fu raggiunto gradualmente nel corso della storia naturale successiva. Entrambi i processi, comunque, non sembrano aver riempito il morfospazio in modo omogeneo. E qui si apre il secondo grande enigma evoluzionistico legato alla diversificazione degli animali.

Per un certo piano corporeo (essere un crostaceo, essere un cordato e così via) o per un certo insieme di caratteri, per esempio la forma delle conchiglie delle chiocciole terrestri, si può costruire matematicamente uno spazio immaginario che contenga tutte le combinazioni di forme possibili. Potremmo definirlo un morfospazio locale, cioè ristretto ai pochi parametri considerati. In pratica è lo spazio complessivo che l'evoluzione può esplorare in linea di principio, rappresentato su assi cartesiani attraverso parametri quantitativi definiti. A questo punto si confronta questo morfospazio ideale con la realtà, cioè con le forme che quel carattere o quel piano corporeo assume e ha assunto nella storia naturale in tutte le specie effettivamente esistenti ed esistite di quel gruppo.

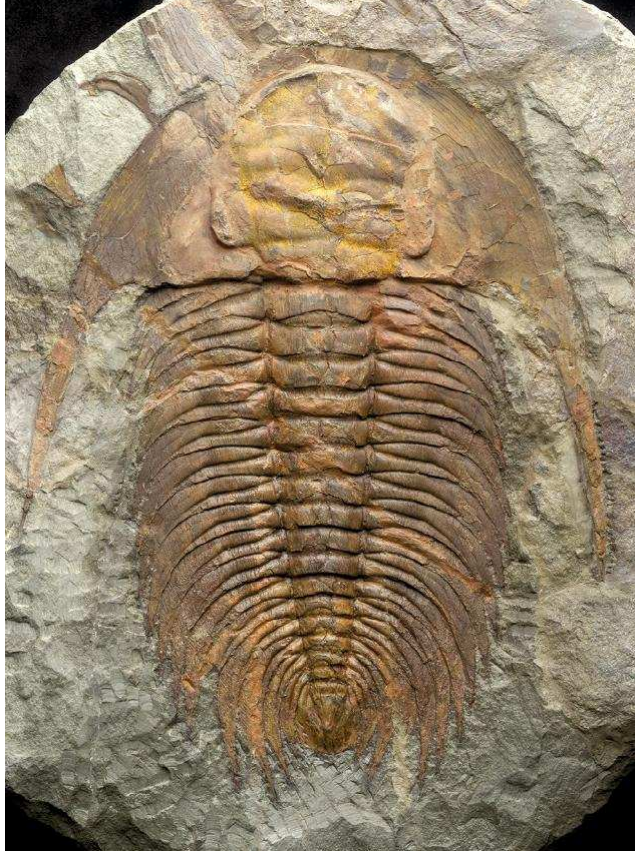
L'esercizio è già stato fatto per diversi tipi di animali, e ogni volta si scopre un fatto interessante: sembra che l'evoluzione abbia esplorato solo un piccolo sottoinsieme del possibile. Le soluzioni reali si ammassano in poche aree ristrette del morfospazio ideale così calcolato, lasciando vaste regioni vuote e immensi divari tra una zona popolata e l'altra. Grazie al lavoro sui «Proceedings of the National Academy of Sciences», adesso sappiamo che questa disomogeneità vale non solo per i morfospazi ristretti, ma anche per il morfospazio generale della disparità animale (attuale e passata) calcolato su centinaia di caratteri come abbiamo visto in precedenza. Come si spiega?

La prima risposta possibile è che le aree addensate siano le preferibili perché lì si concentrano le forme ottimali, cioè gli adattamenti migliori, i picchi raggiunti gradualmente dalla selezione naturale, mentre altrove le specie si ritroverebbero a quote più basse di fitness, cioè con minori capacità riproduttive e di sopravvivenza in un dato ambiente. Per Daniel Dennett, filosofo e scienziato cognitivo della Tufts University, il morfospazio sarebbe lo «spazio dei progetti» e, al netto del caso, il processo ottimizzante di «ricerca e sviluppo» dell'evoluzione per selezione naturale spingerebbe gli animali verso le regioni migliori per la sopravvivenza.

In certi casi è così, ma non sempre. Talvolta le specie se la sono cavata in regioni non eccelse, ma accettabili. Vi sono poi intere zone del morfospazio che avrebbero garantito buone possibilità di sopravvivenza a chi le avesse esplorate, ma non furono mai raggiunte da alcuna specie. Possiamo allora ipotizzare che nessun animale abbia mai adottato quelle soluzioni a causa di vincoli genetici, strutturali o di sviluppo che ne precludevano l'accesso. Oppure, come terza ipotesi, dobbiamo accettare l'idea che la contingenza storica non abbia finora mai fatto arrivare nessuno da quelle parti, per caso. Il percorso di mutazioni genetiche giuste, per esempio, potrebbe casualmente non essersi realizzato, rendendo incompleta l'esplorazione del morfospazio.

Quest'ultimo è comunque sempre più grande rispetto ai limiti raggiunti dalle specie realmente evolutesi fin qui dalla nascita della vita sulla Terra, il 99,9 per cento delle quali peraltro si è già estinto. Solo un piccolo sottoinsieme dell'universo dei possibili piani corporei si è effettivamente realizzato. Sembra di sentir riecheggiare l'adagio che William Shakespeare fa pronunciare ad Amleto: «Ci sono più cose in cielo e in terra, Orazio, di quante tu ne possa sognare nella tua filosofia». Ecco, c'erano più cose in cielo e in terra di quelle che l'evoluzione abbia mai sognato. Il possibile è più vasto del reale. E la natura più grande e fantasiosa di tutte le nostre teorie per comprenderla.

Ora il gruppo coordinato da Donoghue pensa di aver trovato qualcosa di nuovo, una quarta ipotesi sulle cause delle lacune del morfospazio: sovrapponendo il morfospazio attuale su quello fossile si scopre che nel lontano passato quest'ultimo era più omogeneo. Fino a oggi potremmo aver guardato nella direzione sbagliata. La causa delle aree vuote nel morfospazio non risiederebbe solo nella mancanza di innovazione dell'evoluzione né in vincoli preesistenti, bensì nei capricci e nelle irregolarità della grande mietitrice: l'estinzione. In alcune regioni del morfospazio la scomparsa di forme intermedie, come già Darwin aveva ipotizzato commentando la disomogeneità dell'unico diagramma ad albero da lui inserito nell'*Origine delle specie*, è stata più forte e ha generato i buchi che vediamo oggi tra i raggruppamenti maggiori di forme animali, per esempio tra artropodi e onicofori (detti anche vermi di velluto, sono vermi terrestri con zampe e antenne). Reintroducendo nella matrice gli strani animali di Burgess Shale, molte lacune si colmano. Il problema quindi non stava solo nell'incapacità degli animali di esplorare quelle zone né nella disomogeneità casuale dell'esplosione cambriana, ma nella potatura successiva che sul lungo periodo spazzò via un sacco di forme intermedie.

Se verrà confermata questa ipotesi, dovremo concludere che

Fossile di *Acadoparadoxides briareus*, specie estinta di trilobite vissuta nei mari del Cambriano circa 500 milioni di anni fa.

Sinclair Stammers/SPL/AGF

prima o poi gli animali, lasciati a se stessi, riempirebbero tutto il morfospazio possibile, ma vincoli interni, estinzioni e stravolgimenti ecologici non lo permettono. Qual è dunque il motore che ha spinto le forme animali a esplorare sempre di più i limiti del morfospazio possibile? È solo una questione di tempo o dobbiamo supporre che esistano meccanismi interni che favoriscono la diversificazione, come per esempio la crescita delle dimensioni del genoma e del repertorio di proteine sfruttabili, o la diversa regolazione e l'espansione di nuove famiglie di geni?

Per rispondere a quest'ultima domanda gli autori hanno focalizzato la loro metrica a livello degli antenati comuni dei singoli *phyla* e hanno correlato la disparità di morfologie risultante con altre banche dati biologiche. Come già teorizzato da Daniel McShea e Robert Brandon, filosofi e biologi della Duke University di Durham, in un libro molto citato del 2010, *Biology's First Law*, la crescita di disparità animale sarebbe una tendenza intrinseca nell'evoluzione, correlata all'aumento della complessità morfologica degli organismi, che viene misurata in termini di diversità dei tipi cellulari. C'è anche una buona correlazione con l'aumento della variazione nelle dimensioni corporee. Disparità di un *phylum* e sua diversità interna (numero di specie) vanno pure di pari passo. Se ne deduce che i mezzi attraverso cui l'evoluzione ha accresciuto la disparità animale sono di sicuro: il numero dei tipi cellulari impiegati; l'aumento medio delle dimensioni corporee; la diversificazione delle specie.

Che dire però delle cause remote? Il tempo da solo non basta: i *phyla* con origine più antica non sono necessariamente i più disparati. Bisogna guardare a cause intrinseche, forse genetiche, della disparità. Dai dati pubblicati sui «Proceedings of the National Academy of Sciences» vediamo che la crescita di complessità morfologica è ben correlata con l'aumento delle dimensioni del genoma, come aveva previsto T. Ryan Gregory, genetista dell'Università di Guelph, in Canada, ma non in termini di numero di geni e nemmeno di repertorio di proteine usate. Quindi il segreto sta probabilmente nella regolazione genica, in particolare nell'espansione delle reti di regolazione, come attestato dal fatto che i *phyla* con più disparità presentano anche un maggior numero di famiglie di microRNA, cioè piccole molecole endogene di RNA non codificante che sono attive nella regolazione dell'espressione genica (in particolare nel silenziamento o meno dei geni). Sembra così confermata l'idea di Derek Briggs, paleontologo di Yale, secondo il quale i primi animali avrebbero evoluto la capacità di sviluppare tutti quei nuovi e diversi piani corporei, con i loro moduli strutturali spesso ripetuti e ricombinati, grazie alla comparsa dei geni dello sviluppo. All'inizio con grande flessibilità, poi sempre meno.

Ricordiamo comunque che la maggior parte del morfospazio ideale non è mai stata raggiunta da alcun animale reale, segno secondo gli autori che gran parte delle combinazioni di caratteri corrispondenti a quelle zone non erano possibili a prescindere, a causa di vincoli di sviluppo contingenti e profondi, cristallizzatisi all'inizio dell'evoluzione dei metazoi. Questa rigidità non ha impedito comunque alla disparità animale di fare un balzo in avanti nel tardo Devoniano, quando alcuni animali (principalmente cordati, artropodi e anellidi) si liberarono dai vincoli fisici dell'ambiente acquatico e occupando le nuove nicchie ecologiche terrestri esplorarono anche nuovi reami del morfospazio. Il che dimostra che la capacità di innovazione non è andata perduta dopo il Cambriano e che anche fattori estrinseci come l'espansione dello spazio ecologico hanno avuto un ruolo chiave.

Una vita complessa

Da ricerche come questa emerge tutta la ricchezza della spiegazione evoluzionistica contemporanea, che sta diventando sempre più pluralista e sempre meno dicotomica. La disparità animale non si è evoluta in modo solo punteggiato o in modo solo gradualista, ma si è alimentata con un'alta frequenza di piccoli cambiamenti e con una frequenza più bassa di cambiamenti più ampi.

Così pure, fattori intrinseci (genetici) ed estrinseci (ecologici) non si elidono, si compenetrano. I geni come cassetta degli attrezzi sono indispensabili ma non bastano: anche le occasioni ecologiche fecero la differenza, già peraltro agli esordi del Cambriano grazie alla fine delle glaciazioni globali e soprattutto alla maggiore disponibilità di ossigeno in atmosfera e nelle acque, come confermato di recente anche da uno studio su «Nature Geoscience».

Come scrisse Darwin, l'evoluzione è un intreccio di leggi di natura e di caso. Il risultato è una storia affascinante che ancora ci riserva sorprese. È una storia che ci riguarda da vicino, visto che un bel giorno, molto tempo dopo il Cambriano, nel morfospazio dei cordati fece la sua comparsa un certo *Homo sapiens*. ■

PER APPROFONDIRE

Evolution of Metazoan Morphological Disparity. Deloine B. e altri, in «Proceedings of the National Academy of Sciences», Vol. 115, n. 38, pp. E8909-E8918, 18 settembre 2018.

Biology's First Law. McShea D. e Brandon R., University of Chicago Press, Chicago, 2010.

Possible Links Between Extreme Oxygen Perturbations and the Cambrian Radiation of Animals. He T. e altri, in «Nature Geoscience», Vol. 12, n. 6, pp. 468-474, 6 maggio 2019.

The Cambrian Explosion: the Construction of Animal Biodiversity. Erwin H.D. e Valentine J.W., Freeman, New York, 2013.

CLIMA

BRUTTO TEMPO

Recenti disastri dimostrano che il cambiamento climatico sta rendendo sempre più forti le tempeste invernali, le piogge torrenziali e le ondate di calore estive

di Jennifer Francis

Illustrazione di Peter Horvath

IN VISTA

È nata nel solito modo: una massa disorganizzata di nuvole è emersa sopra l'Oceano Atlantico, al largo della costa sporgente dell'Africa occidentale, appena a nord dell'equatore. Qui la pressione atmosferica era bassa, come accade normalmente verso la fine dell'estate.

Jennifer Francis è *senior scientist* presso il Woods Hole Research Center a Falmouth, Massachusetts. È stata docente ricercatrice alla Rutgers University dal 1994 al 2018 e fa parte del comitato scientifico di «Scientific American».

Un incendio divampa a Kårböle, Svezia, nel luglio 2018, rafforzato da calore e siccità abnormi (*1*). A settembre un anticiclone inamovibile intrappola l'uragano Florence per giorni sopra gli Stati Uniti orientali, inondando città come Lumberton, nel North Carolina (*2*).

In questa zona la variabilità naturale del clima terrestre genera perturbazioni tropicali ogni anno: a volte sono più numerose, a volte meno, a volte diventano uragani. Secondo tutti i modelli di previsione meteo, le nuvole si sarebbero raggruppate formando una tempesta che, senza provocare danni, avrebbe curvato a nord-ovest, verso il centro dell'Atlantico, lontano dalla terraferma.

Il 1° settembre 2018 la tempesta tropicale Florence ha cominciato proprio così, ma poi ha svoltato verso ovest, riorganizzandosi, e sembrava puntare verso i Caraibi. Un'altra perturbazione preoccupante era già in agguato vicino a Porto Rico, ancora sconvolto dalla devastazione provocata un anno prima dall'uragano Maria. Inoltre nel Pacifico tropicale stavano turbinando tre cicloni di grandi dimensioni, alimentati da temperature dell'oceano nettamente sopra la norma. Questa folla di tempeste prendeva energia dalle temperature record dell'oceano, in continua crescita fin dagli anni settanta di pari passo con quelle dell'atmosfera, spinte dai gas serra che intrappolano il calore: sono effetti globali del cambiamento climatico. Le tempeste sono alimentate dal calore dell'oceano e dal vapore acqueo nell'atmosfera, che a sua volta è in crescita.

Florence però è rimasta debole a causa di fattori contrastanti. Questa apparente fortuna ha invece messo in ansia i meteorologi. Le tempeste più deboli sono guidate più facilmente dai venti a bassa quota, che stavano soffiando da est a ovest, dritti verso la costa orientale degli Stati Uniti. Rasentavano il margine meridionale di un grande anticiclone, circolare e stranamente forte, fermo in mezzo all'Atlantico settentrionale. È naturale che si formino gli anticicloni, ma le prove dimostrano che sempre più spesso alcuni restano immobili: è un sintomo regionale di un clima più caldo.

Il 4 settembre è successo qualcosa di inatteso: Florence, ancora debole, si è spostata in un punto insolitamente caldo dell'Atlantico centro-occidentale. Alimentata da quel calore, si è intensificata fino a diventare un uragano di categoria 4, arrivando a una latitudine nord quasi da record. Le zone di acqua calda sparse nell'oceano sono un altro effetto regionale del cambiamento climatico.

Man mano che Florence si rafforzava, i modelli di previsione cominciavano a convergere: sembrava probabile che colpisse il North e il South Carolina sulla costa, per poi fermarsi e scatenare un'alluvione, come aveva fatto un anno prima l'uragano Harvey a Houston. Come previsto, il 14 settembre Florence ha colpito i due Stati sulla costa, fermandosi per quattro giorni. I venti a bassa quota che avevano spinto il sistema ormai erano troppo deboli per spostarlo. In alcuni luoghi Florence ha rovesciato un'ottantina di centimetri di pioggia, e si dice abbia provocato la morte di oltre 50 persone e milioni di animali, oltre a danni valutati intorno ai 20 miliardi di dollari.

Non sarà facile dimenticare la furia di Florence, né la dimostrazione evidente del cambiamento climatico all'opera. L'insolita gravità dell'uragano si può attribuire a effetti specifici del cambiamento del clima: più calore nell'aria e nell'oceano, più vapore acqueo, il tenace anticiclone di blocco e i venti deboli che hanno guidato la tempesta. Questi fattori sono in gioco in tutto il mondo: favoriscono un rapido intensificarsi delle tempeste, maggiori precipitazioni, alluvioni più gravi e venti di tempesta più forti. Florence è stata solo uno tra molti esempi di come il cambiamento climatico stia influenzando gli eventi meteo estremi. Svariati «cicloni bomba» hanno flagellato il nord-est degli Stati Uniti. Un'ondata di aria artica, l'anticiclone Hartmut, ha gelato l'Europa. Forti ondate di calore hanno messo in ginocchio Giappone, Scandinavia e Grecia. Le alluvioni hanno danneggiato parti di Venezia, Parigi e Maryland.

Ovviamente simili disgrazie sono sempre accadute. Di anno in anno però è sempre più evidente che l'attuale epidemia di eventi meteo strani non si può spiegare con la variabilità naturale. Anche se in passato gli scienziati stavano attenti a non collegare direttamente il cambiamento climatico a singoli eventi meteorologici, oggi sosteniamo che sia proprio questo il motivo per cui avvengono più spesso alluvioni di ampia portata. Le ondate di calore mortali sono più calde e lunghe. In alcuni luoghi anche i periodi di freddo durano di più.

IN BREVE

Oggi gli scienziati possono dimostrare che specifici eventi meteo estremi sono aggravati dal cambiamento climatico, non solo dalla variabilità naturale del clima.

I fattori globali del cambiamento climatico comprendono più calore negli oceani di tutto il mondo e più vapore nell'atmosfera.

I fattori regionali comprendono l'espansione della zona tropicale, una «chiazza fredda» nell'Oceano Atlantico e un vortice polare disturbato; tutti possono interagire con la variabilità naturale.

1

2

Mats Andersson/Getty Images (*1*); Joe Raedle/Getty Images (*2*)

In che misura gli eventi estremi sporadici, che nel 2018 hanno provocato danni per oltre 160 miliardi di dollari nel mondo, si possono attribuire al cambiamento del clima? Per rispondere bisogna fare chiarezza sul ruolo di tre fattori generali.

Il primo è l'effetto globale di più calore nell'oceano e più calore e vapore nell'atmosfera. La questione del vapore acqueo merita più attenzione di quanta ne riceva: si tratta di un altro gas serra che intrappola calore, ne emette ancora di più quando si condensa formando le nuvole e alimenta le precipitazioni delle tempeste. Il secondo fattore sono gli effetti regionali, per esempio i caparbi anticicloni di blocco, le distese di ghiaccio marino in via di scioglimento, una crescente «chiazza fredda» di acqua dell'oceano a sud della Groenlandia, una Corrente del Golfo più lenta e un vortice polare sempre più disturbato. Il terzo riguarda i modi complicati in cui le variazioni naturali, come El Niño e La Niña, interagiscono con i fattori regionali. La ricerca su questa interazione è all'avanguardia, controversa e proficua. Oggi possiamo capire meglio come e perché il cambiamento climatico sta aggravando i fenomeni meteo estremi, e questo indica come dovremo prepararci a pericoli sempre più frequenti e intensi.

Un brutto *nor'easter*

L'atmosfera terrestre è un mantello di gas in continuo movimento. L'aria si riscalda e si raffredda costantemente: dl giorno arriva l'energia solare, che di notte torna nello spazio per l'irradiazione dalle superfici calde. Un riscaldamento non uniforme genera venti locali che soffiano dappertutto. L'acqua evapora in continuazione dalla terra e dal mare, si condensa nell'aria e ricade sotto forma di pioggia o di neve.

Eppure in questo caos si trovano schemi stranamente prevedibili, determinati da fattori di influenza come la latitudine, la rotazione terrestre, le catene montuose, la circolazione negli oceani e altri ancora. Nell'Atlantico gli uragani come Florence si formano nella zona orientale dei tropici e si spostano verso ovest. Le tempeste tropicali si muovono in questa direzione anche nel Pacifico. In tutto l'emisfero boreale una corrente a getto polare soffia da ovest a est, a una latitudine vicina al confine tra Stati Uniti e Canada; nell'emisfero australe un'altra corrente a getto polare attraversa le zone più meridionali del Sud America e dell'Africa. Hanno un andamento più ciclico i grandi sistemi di venti collegati alle fluttuazioni delle temperature degli oceani, come El Niño e La Niña, che vanno e vengono ogni 3-8 anni e influenzano venti e precipitazioni in tutto il mondo. I dati ottenuti da campioni di fango estratti da vari fondali marini dimostrano che queste tendenze si perpetuano da centinaia di migliaia di anni.

Caos e coerenza caratterizzano anche gli oceani, su cicli più lunghi, tra acque che continuano a scaldarsi, raffreddarsi e scorrere. L'Oscillazione pacifica decadale (PDO) è un'altalena di temperature calde e fredde tra la parte orientale e quella occidentale dell'Oceano Pacifico settentrionale: ogni fase dura circa un decennio. Il capovolgimento meridionale della circolazione atlantica è una corrente lenta di acqua superficiale calda e salata, che si dirige verso nord nell'Atlantico occidentale, poi perde calore, si immerge in profondità e scorre di nuovo a sud, verso l'Antartide. Un giro completo lungo questo itinerario dura un migliaio di anni.

Le interazioni tra l'atmosfera e gli oceani introducono nel clima la variabilità naturale. In determinate regioni alcuni anni sono più caldi o più freddi, oppure più umidi o più secchi. Ma quegli stessi dati ricavati da campioni di fango risalenti ai millenni passati dimostrano che la variabilità ha dei limiti; accade raramente che il clima superi certi confini. Finora.

Ho vissuto in prima persona una di queste eccezioni nel tardo inverno del 2018. È normale che marzo arrivi ruggendo come un leone, ma stavolta ha proprio esagerato. Madre Natura stava scatenando una serie di potenti *nor'easter*, cioè tempeste che si formano appena al largo della costa atlantica e flagellano il litorale orientale del Nord America con venti da nord-est. I tre fattori del cambiamento climatico – più calore e vapore a livello globale, effetti regionali e interazione tra la variabilità naturale e questi effetti – stanno rafforzando queste tempeste.

Stavo controllando con ansia gli ultimi modelli di previsione. Evidenziavano un tremolio apparentemente innocuo nella corrente a getto sopra il Pacifico settentrionale, e tutti ne concludevano che avrebbe raggiunto la costa atlantica, generando una tempesta enorme, diretta verso la nostra città costiera nel sud-est del Massachusetts. I modelli scommettevano che si sarebbe formata rapidamente una bufera: tecnicamente, un «ciclone bomba». Sarebbe stato il terzo grande nor'easter della stagione.

Gli ingredienti c'erano tutti. L'aria fredda si era fermata sopra gli Stati Uniti orientali (un fattore che si presenta per natura). Il calore extra nell'oceano (un fattore globale) ha portato energia e umidità in abbondanza per la formazione di una tempesta. Le temperature dell'acqua dell'Atlantico al largo del New England erano molto al di sopra della norma (un fattore regionale). Un altro ingrediente

La tempesta potenziata

Il 2 marzo 2018 un nor'easter di nome Riley colpisce il nord-est degli Stati Uniti: provoca nove vittime, riversa sulla popolazione varie spanne di neve e parecchi centimetri di pioggia, scatena onde oceaniche e toglie l'elettricità alle case di 2 milioni di persone, me compresa. La variabilità naturale del clima determina alcuni ingredienti della tempesta, ma la sua gravità è amplificata dagli effetti del cambiamento climatico, a livello globale e regionale.

La perturbazione nella corrente a getto (una piccola onda nel più ampio andamento a creste e saccature) si sposta verso est e si appiattisce, ma quando incontra il forte contrasto nella temperatura dell'aria lungo la costa orientale si rafforza di nuovo (effetto regionale) e acquisisce altra energia da una corrente a getto subtropicale che attraversa gli Stati Uniti meridionali (variabilità naturale).

Illustrazione di Matt Twombly; Fonti: national oceanic and atmospheric administration (corrente a getto e temperatura dell'oceano pacifico nel quarto riquadro, dati nel quinto e sesto, e fascia delle tempeste nell'ottavo); Università del Maine (dati sulla temperatura nel secondo e terzo riquadro, e temperature dell'aria artica nel quarto); National Weather Service (grafico della bombogenesi)

importante è stato l'interazione tra fattori naturali e regionali. Verso la fine del 2013 l'Oscillazione pacifica decadale è passata dalla cosiddetta fase negativa a quella positiva, seguendo il proprio ciclo naturale. Ha portato le temperature del mare sopra la media lungo la costa occidentale del Nord America. Il calore extra pompato nell'atmosfera da quest'acqua calda favorisce la formazione di una protuberanza verso nord (detta cresta) nella corrente a getto sopra il Nord America occidentale, che può arrivare all'Alaska.

È qui che entra in gioco l'interazione con un effetto regionale. Nell'Artide le temperature dell'aria sono aumentate 2-3 volte più velocemente che nel resto del pianeta, soprattutto in inverno. Questo riscaldamento è dovuto in gran parte alla straordinaria perdita di volume del ghiaccio marino artico, pari al 75 per cento in quarant'anni. La cresta pacifica può attingere a questo calore extra, e può così intensificarsi e durare a lungo. Questa cosiddetta «cresta esageratamente resistente» è in gran parte responsabile della lunga durata di siccità e ondate di caldo che hanno preparato il terreno agli incendi divampati lungo la costa occidentale degli Stati Uniti.

In genere una cresta marcata è accompagnata a est da una grande flessione verso sud (detta saccatura), che in questo caso si trovava sopra la parte orientale del Nord America. Una saccatura profonda permette all'aria artica fredda di spingersi molto a sud, generando un netto contrasto di temperatura con le acque calde dell'Atlantico lungo la costa orientale. L'atmosfera non ama i contrasti di temperatura. Genera le tempeste per miscelare le masse d'aria nel tentativo di bilanciare le differenze; i cicloni bomba sono un esempio di questo processo. Questo andamento a creste e saccature tende a generare i nor'easter, e negli ultimi inverni è diventato sempre più frequente.

La scienza sta rivelando che l'aggravarsi del meteo estremo non si può spiegare con la variabilità naturale

Come prevedibile, i dati hanno dipinto uno scenario di «bombogenesi», in cui la pressione atmosferica di una tempesta diminuisce di oltre 24 millibar in 24 ore, portandola a «esplodere» in dimensioni e potenza. Nel mirino c'era il mio quartiere. Il 2 marzo, al crepuscolo, è arrivato il vento del nor'easter, portando pioggia, neve, blackout e una forte erosione da parte di onde alte e burrasche. Di notte il boato del vento era così forte che non ho sentito crollare nemmeno uno dei 20 grandi alberi caduti intorno a noi.

La tempesta ci ha messo un bel po' ad andarsene, dato che un anticiclone di blocco vicino alla Groenlandia ne ha impedito il movimento, devastando una mezza dozzina di Stati con venti da uragano. Il nor'easter ha mietuto almeno nove vittime, ha provocato un blackout per oltre 2 milioni di persone (cinque giorni nella nostra città) e inondato le comunità costiere.

Tempo invernale impazzito

Nell'inverno del 2018 la serie di nor'easter distruttivi non è stata l'unico fenomeno meteo potenziato dal cambiamento climatico. Parigi e Venezia sono state colpite dalle più gravi alluvioni dell'ultimo mezzo secolo in seguito a piogge persistenti, mentre tempeste mortali hanno flagellato la Germania e il nord della Francia. In Nord America è finito sotto i riflettori il «colpo di frusta meteorologico»: passaggi improvvisi e clamorosi da un estremo di lunga durata a un altro.

Anche se le ricerche sono ancora frammentarie, si stanno accumulando le prove che queste alternanze esagerate si stiano verificando più spesso e che siano in gioco i tre fattori di influenza sul clima. Un esempio concreto: a gennaio, per tre settimane, gli Stati Uniti orientali sono stati preda di un freddo così rigido che nel sud della Florida le iguane cadevano dagli alberi, quasi in coma per il gelo, mentre negli Stati occidentali gli abitanti si crogiolavano a temperature sopra la norma. Poi, all'inizio di febbraio, è arrivato il colpo di frusta: un'inversione improvvisa della corrente a getto ha portato un caldo record in centinaia di città negli Stati Uniti orientali. Le temperature sono aumentate di oltre 22 gradi in 24 ore. Allo stesso tempo, sugli Stati occidentali è calato il gelo. Nel campo di battaglia atmosferico tra le masse d'aria a est e quelle a ovest, forti tempeste nella valle del Mississippi hanno provocato le alluvioni più gravi degli ultimi decenni. I fattori globali, quelli regionali e la loro interazione avevano colpito ancora.

Senza dubbio il riscaldamento globale e l'umidità complessivi hanno dato uno stimolo a questi estremi. E aveva preparato il terreno la stessa corrente a getto, con le sue follie regionali, contribuendo alla serie di cicloni bomba. Il colpo di frusta meteorologico ha colpito gli Stati Uniti e il Canada anche nel febbraio 2019; in alcune aree le temperature sono rimbalzate di circa 28-33 gradi, e i venti gelidi di oltre 55 gradi in pochi giorni.

Estate torrida e piovosa

Anche l'estate del 2018 ha portato nell'emisfero boreale una varietà di eventi meteo gravi, in gran parte esasperati dal cambiamento climatico. Mentre il Giappone, il Texas e perfino la Scandinavia hanno sofferto per settimane un caldo estremo, la costa orientale degli Stati Uniti ha vissuto la stagione più umida della sua storia. La siccità persistente ha flagellato gli Stati Uniti occidentali, parti dell'Europa e del Medio Oriente, contribuendo a una terribile serie di incendi. Le condizioni meteo estreme dell'estate hanno rovinato i raccolti, stimolato la fioritura di alghe tossiche, causato la chiusura dei sistemi di raffreddamento dei reattori nucleari e scatenato blackout in quattro continenti.

Alcuni effetti erano palesemente collegati al fattore globale. Le temperature medie più alte provocano ondate di calore più forti. Il vapore acqueo extra alimenta gli acquazzoni estivi e contribuisce ad aumentare le temperature notturne catturando altro calore vicino alla superficie. Il calore eccezionale e l'umidità possono formare un abbinamento letale, dato che per il corpo umano diventa difficile raffreddarsi con l'evaporazione del sudore. In tutto il mondo, migliaia di persone prive di aria condizionata sono morte.

Sono state meno dirette le influenze climatiche sulla corrente a getto estiva, un argomento di ricerca letteralmente «caldo». È già chiaro però che sia i fattori globali sia quelli regionali contribuiscono a favorire una corrente a getto stranamente ondulata, come quella che ha imprigionato la Scandinavia in ondate di caldo, siccità e incendi.

Che ruolo hanno svolto i cambiamenti a livello regionale? In primavera e d'estate, il riscaldamento avviene in una striscia di terra a sud della costa artica canadese e di quella russa. Lì la copertura di neve primaverile si scioglie sempre prima di anno in anno. La perdita di questa superficie molto riflettente fa sì che il terreno sottostante sia esposto in anticipo a una forte luce solare primaverile, e quindi si secchi prima. Il terreno secco si riscalda molto più velocemente di quello umido, quindi le temperature aumentano. Il riscaldamento anticipa l'inizio dell'estate, spostando verso nord la corrente a getto prima del solito e permettendo all'aria calda di penetrare ad alte latitudini.

La striscia di terra insolitamente calda può contribuire a dividere la corrente a getto in due rami: un evento frequente in inverno, ma meno in estate. Spesso i sistemi meteorologici tra i due rami restano intrappolati per lunghi periodi, essendoci poco vento per spostarli. Nell'estate 2018 la corrente a getto sopra Eurasia e Nord America è rimasta per lo più divisa, causando in alcune aree una situazione costante di caldo secco e in altre lunghi periodi di pioggia, che hanno raggiunto livelli record in entrambi i continenti.

Allacciate le cinture

Il meteo del 2018 è stato solo un'anticipazione di ciò che vedremo via via che i gas serra continuano ad accumularsi. Alcune conseguenze degli effetti globali – oceani e aria più caldi e aumento dell'umidità atmosferica – sono evidenti e dirette. Sono in corso intense ricerche per districare il miscuglio di effetti regionali e la loro interazione con la variabilità naturale. Prendiamo quattro esempi.

Le prove indicano che la zona tropicale terrestre, intorno all'equatore, si sta allargando verso i poli. E così si spingono in questa direzione le fasce delle tempeste, oltre a rendere più calde e aride alcune regioni temperate. I sintomi più evidenti si vedono nelle zone secche che segnano i limiti settentrionali e meridionali dei tropici, come il sud della California, il Mediterraneo e l'Australia. Gli scienziati sono al lavoro per capire i probabili fattori di influenza: riscaldamento, polvere atmosferica e particelle di fuliggine che modificano le temperature dell'aria e la formazione delle nuvole.

Le prove indicano che la zona tropicale terrestre, intorno all'equatore, si sta allargando verso i poli

Un altro fattore regionale che si sta esaminando è il rallentamento della Corrente del Golfo, la grande corrente oceanica che dal Golfo del Messico sale lungo la costa orientale americana, attraversa l'Atlantico settentrionale e si dirige verso il Regno Unito. È il ramo superficiale del più ampio capovolgimento meridionale della circolazione atlantica. Un rallentamento sconvolgerebbe l'andamento del meteo da entrambe le parti dell'oceano. Ci sono poche misurazioni delle condizioni sotto la superficie oceanica, ma le stranezze nelle temperature superficiali, per esempio un calore anomalo lungo la costa orientale e la massa di acque fredde a sud della Groenlandia avvalorano l'ipotesi che questo sistema circolatorio di grandi proporzioni stia effettivamente rallentando. Una variazione dell'andamento delle temperature oceaniche altera la forza e la traiettoria delle tempeste. L'iperattività degli ultimi anni nella fascia delle tempeste nell'Atlantico settentrionale potrebbe essere dovuta a una Corrente del Golfo rallentata, oltre alle acque surriscaldate che con ogni probabilità hanno stimolato i cicloni bomba dell'inverno 2018.

Un'altra caratteristica regionale da tenere d'occhio sono gli anticicloni di blocco. Le osservazioni suggeriscono che stiano diventando più frequenti in alcuni luoghi, per esempio su Groenlandia e Russia occidentale, ma i modelli atmosferici stentano a prevederne lo sviluppo e la fine. I blocchi possono formarsi per svariati motivi, alcuni collegati alla variabilità naturale e altri al cambiamento climatico. I residui delle tempeste tropicali, per esempio, possono immettere naturalmente ondate di energia nella corrente a getto, portandola a deformarsi e a generare vortici orfani. Man mano che gli oceani si riscaldano, però, le tempeste tropicali potrebbero sopravvivere più a nord e più in là nella stagione autunnale, aumentando la probabilità di collisioni con la corrente a getto in grado di provocare un blocco, che quindi può spingere gli uragani e altri sistemi meteorologici in direzioni insolite.

Nell'ottobre 2018, per esempio, l'uragano Leslie si è attardato nell'Atlantico per oltre due settimane, e infine si è spinto dove nessun altro uragano conosciuto era mai andato: appena a ovest del Portogallo. Forti venti e piogge torrenziali hanno flagellato la Penisola Iberica. In quel periodo, sopra l'Europa nordorientale si trovava un forte blocco, responsabile della corrente a getto con un andamento ondulatorio che ha catturato Leslie, portandolo con sé in un lungo viaggio attraverso l'Atlantico.

Un altro fattore regionale è il vortice polare stratosferico, che ha fatto spesso notizia nell'inverno del 2018 e anche in quello del 2019. Si è comportato in modo strano. Questo anello di forti venti circonda una massa di aria gelida sopra il Polo Nord solo in inverno, a un'altitudine intorno ai 50 chilometri. A intervalli di qualche anno, determinate condizioni possono deformare l'anello, o perfino spezzarlo in due o più anelli piccoli, che tendono a migrare verso sud, portando con sé ondate di freddo intenso. Al tempo stesso l'aria calda proveniente da sud invade l'Artico, mettendo sottosopra le temperature. Verso la fine di gennaio di quest'anno, nel periodo del vortice polare spezzato faceva più caldo vicino al Polo Nord che a Chicago.

Questi episodi di riscaldamento improvviso della stratosfera, il cosiddetto *stratwarming*, possono avvenire naturalmente, ma negli ultimi tempi la loro frequenza è aumentata. Recenti studi hanno scoperto che la notevole perdita di ghiaccio marino nell'Oceano Artico, a nord della Russia occidentale, potrebbe contribuire a scatenare questi disturbi del vortice. Man mano che il riscaldamento globale si intensifica, chi di noi abita a latitudini medie potrebbe subire più spesso gli attacchi del vortice polare.

Anche se alcuni aspetti dell'esperimento incontrollato che stiamo imponendo al clima della Terra sono ancora fuori dalla nostra portata, la scienza sta rivelando velocemente che l'aggravarsi degli eventi meteo estremi e delle loro conseguenze si può attribuire al cambiamento climatico. Capire i collegamenti ci aiuterà a vedere il futuro con più chiarezza e a prepararci per l'impatto sull'agricoltura, la sicurezza internazionale, la vita nel mare, le foreste, le risorse di acqua dolce, le infrastrutture e la salute umana. Gli effetti sono già evidenti, e non faranno che peggiorare.

Eppure c'è qualcosa che fa ben sperare. L'ondata di maltempo ha acceso i riflettori sulla campagna ben finanziata per diffondere disinformazione e provocare dubbi nell'opinione pubblica sul cambiamento climatico. Nonostante ciò che affermano gli scettici, la variabilità naturale non è in grado di spiegare gli eventi estremi che vediamo e sentiamo già. Secondo recenti sondaggi, la maggior parte delle persone è arrivata ad accettare che il cambiamento climatico è reale ed è provocato da noi. Forse siamo finalmente pronti per affrontare la strada in salita che ci aspetta. ■

PER APPROFONDIRE

More-Persistent Weak Stratospheric Polar Vortex States Linked to Cold Extremes. Kretschmer M. e altri, in «Bulletin of the American Meteorological Society», Vol. 99, n. 1, pp. 49-60, gennaio 2018.

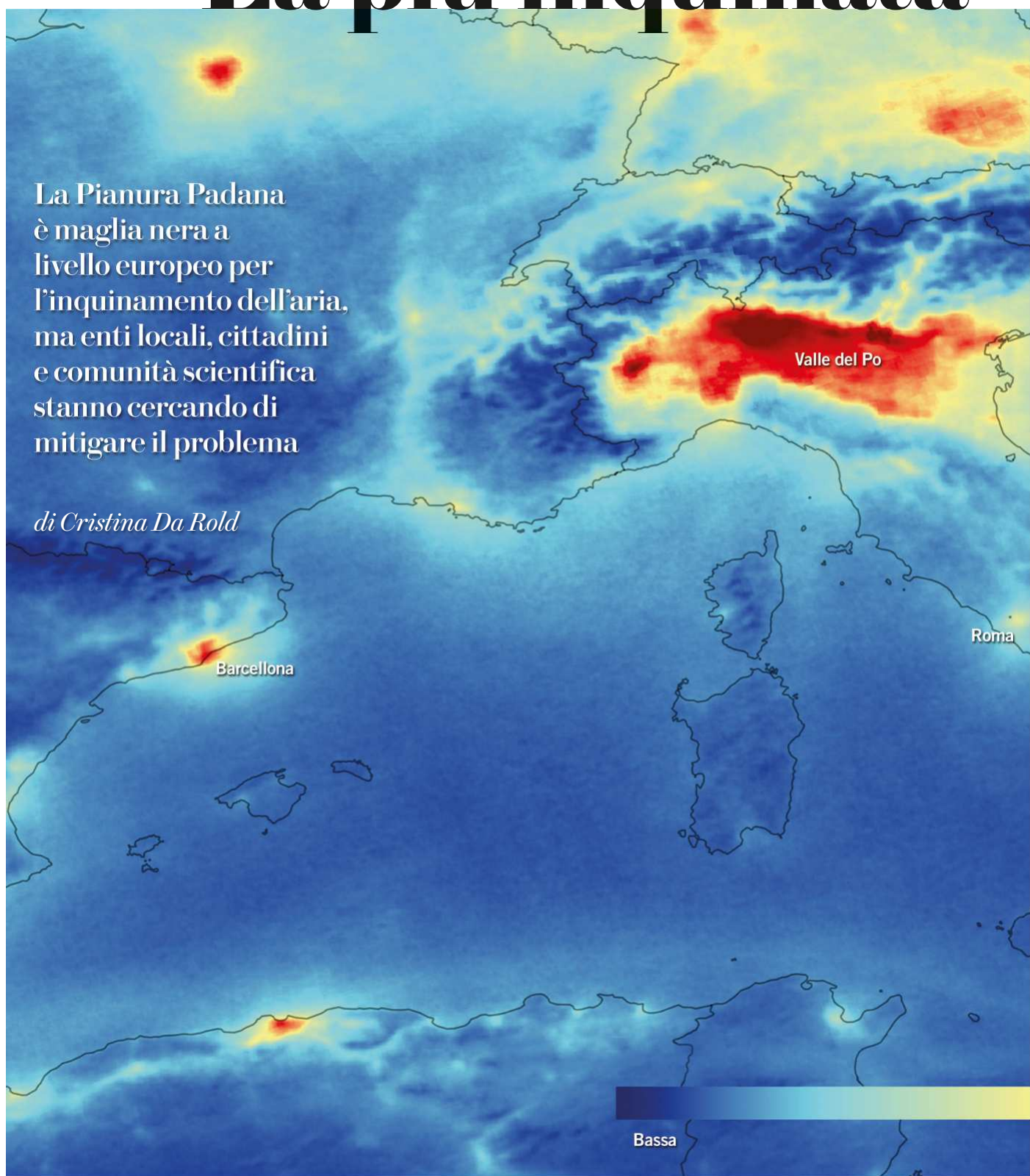
Observed Fingerprint of a Weakening Atlantic Ocean Overturning Circulation. Caesar L. e altri, in «Nature», Vol. 556, pp. 191-196, 12 aprile 2018.

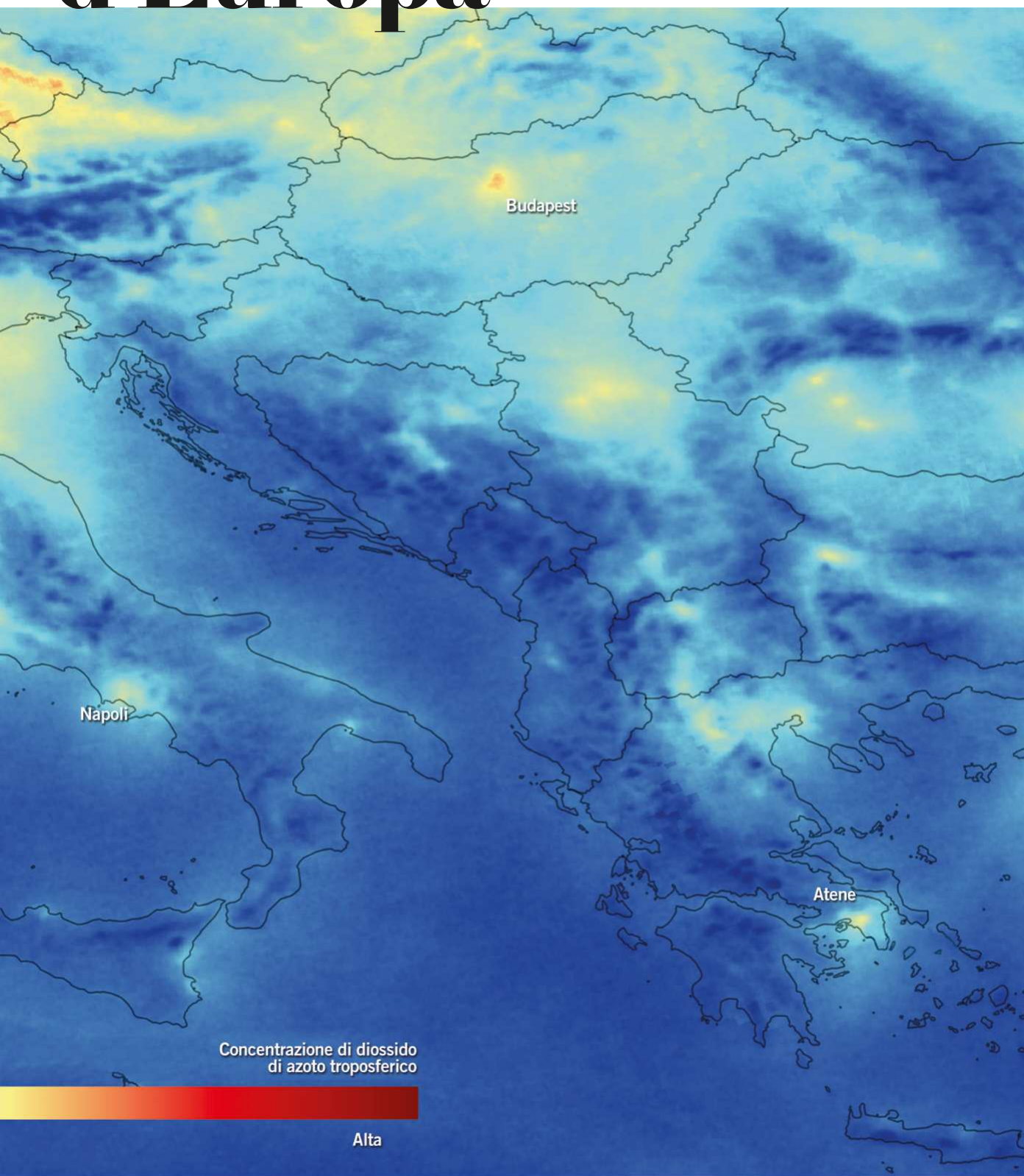
Ripensare la Corrente del Golfo. Riser S.C. e Lozier M.S., in «Le Scienze» n. 536, aprile 2013.

AMBIENTE

La più inquinata

La Pianura Padana è maglia nera a livello europeo per l'inquinamento dell'aria, ma enti locali, cittadini e comunità scientifica stanno cercando di mitigare il problema

di Cristina Da Rold

d'Europa

Vista dallo spazio.
Questa immagine delle concentrazioni di biossido di azoto in atmosfera è stata ottenuta dall'elaborazione di dati registrati dal satellite Sentinel-5P dell'Agenzia spaziale europea tra gennaio e aprile 2019.

Cristina Da Rold è giornalista scientifica *freelance* e *data-journalist*, si occupa di salute ed epidemiologia. Dal 2015 è consulente per la comunicazione per l'Ufficio italiano dell'Organizzazione mondiale della Sanità.

Un pomeriggio del 1880, a nove anni, un piccolo Marcel Proust sta passeggiando per il Bois de Boulogne, a Parigi, forse dopo aver odorato il profumo di una *madeleine* e sorseggiato tè di tiglio. Quello che si porterà dentro per sempre di quel pomeriggio è il primo forte attacco d'asma della sua vita, l'esordio di una malattia che lo accompagnerà per molti anni. «Un attacco di incredibile violenza e tenacia: tale è il bilancio deprimente della notte che ho dovuto trascorrere in piedi...», scriverà alla madre.

Oggi sono moltissimi i bambini che ben prima dei nove anni vivono esperienze simili a quella di Proust, e l'incidenza della malattia è in crescita negli ultimi decenni. In particolare l'asma bronchiale è una malattia molto diffusa in Italia: attualmente colpisce un bambino su dieci sopra i sei anni di età. Nella grande maggioranza dei casi il problema è di origine allergica, ma è provato che una grossa responsabilità ce l'abbiano anche gli inquinanti atmosferici in ambienti sia esterni sia interni: si tratta di particolati (*particulate matter*, PM), cioè particelle solide e liquide di sostanze organiche e inorganiche sospese in aria, ma anche di ossidi di azoto e dell'ozono, una molecola formata da tre atomi di ossigeno legati tra loro. I bambini asmatici risultano infatti più vulnerabili all'inquinamento atmosferico.

A essere pericolose per la salute umana sono soprattutto le particelle con diametro inferiore a 10 micrometri (PM10, un micrometro equivale a un milionesimo di metro) e a 2,5 micrometri (PM2,5), oltre ai già citati ossidi di azoto e all'ozono presenti nei bassi strati dell'atmosfera. Le particelle con diametro compreso tra 5 e 10 micrometri raggiungono la trachea e i bronchi, depositandosi; quelle con diametro inferiore a 5 micrometri possono arrivare addirittura agli alveoli polmonari, ostruendoli.

Un rapporto pubblicato nel 2019 dall'Agenzia europea dell'ambiente mostra che il Bacino Padano, ovvero l'area compresa tra la catena alpina, l'Appennino settentrionale e il mare Adriatico, è maglia nera per la concentrazione di queste sostanze inquinanti.

La situazione preoccupante è dovuta in particolare alla conformazione orografica del Bacino Padano. Il problema non è che vengono emesse molte più sostanze inquinanti rispetto agli altri paesi – negli ultimi trent'anni abbiamo abbattuto sensibilmente le emissioni – ma che in un'area come la Pianura Padana è più complesso «diluire» queste alte concentrazioni a causa di uno scarso movimento dell'aria.

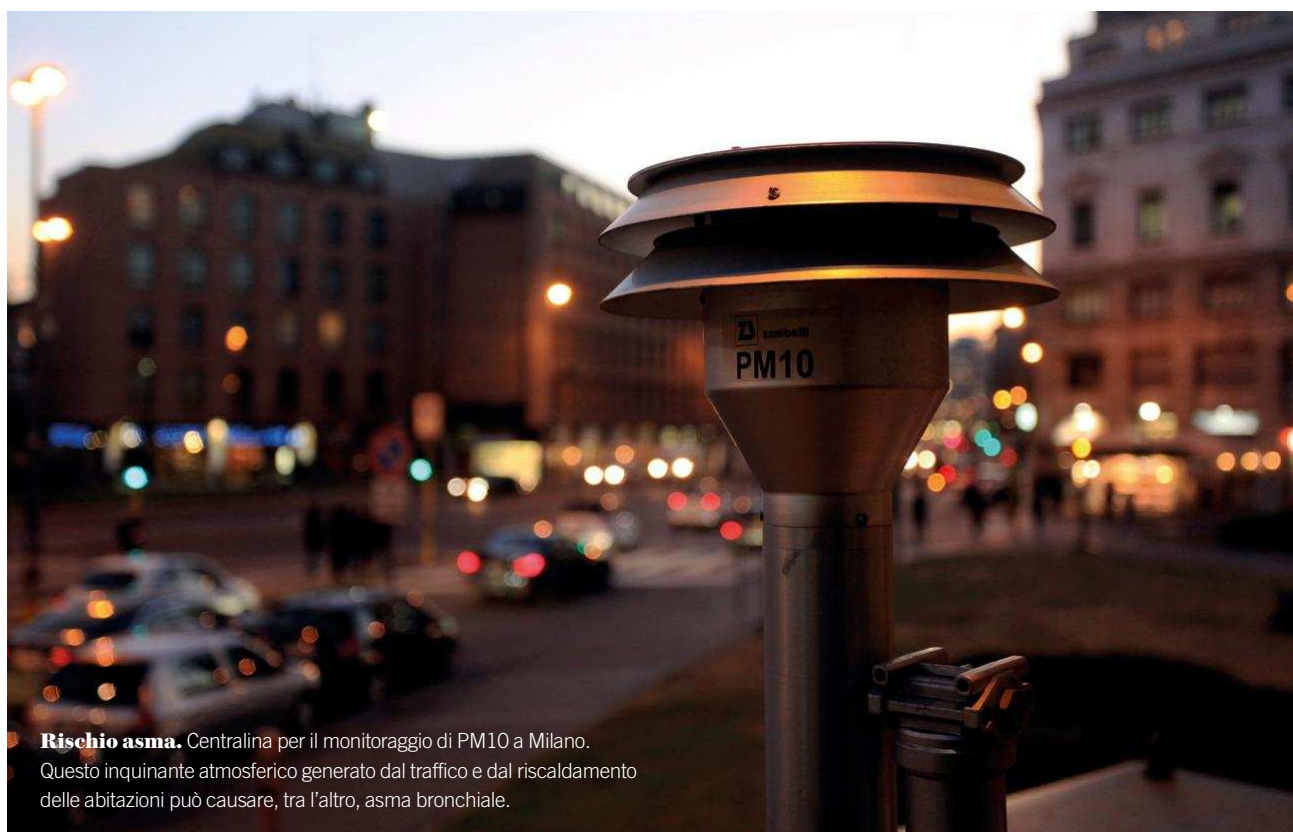
Gli sforzi per mitigare il problema devono andare in due direzioni: da un lato ridurre le emissioni, dall'altro ragionare da subito su come «smaltire» meglio l'inquinamento che produciamo. Per farlo serve una mappatura precisa della qualità dell'aria nel Bacino Padano e le Regioni stanno già collaborando attivamente per affrontare il problema. Nel 2017, tutte le Regioni che compongono il bacino insieme alle relative Agenzie regionali per la protezione ambientale (ARPA) e alle città di Milano, Torino e Bologna, hanno siglato PREPAIR. È un progetto finanziato dall'Unione Europea che durerà sette anni, con l'obiettivo di realizzare le misure

IN BREVE

Secondo l'Agenzia europea dell'ambiente, il Bacino Padano, cioè l'area compresa tra la catena alpina, l'Appennino settentrionale e il mare Adriatico, è maglia nera in Europa per quanto riguarda l'inquinamento dell'aria.

Le sostanze particolarmente pericolose per la salute di milioni di residenti sono le particelle di particolato (PM10 e PM2,5), gli ossidi di azoto e l'ozono.

L'inquinamento della Pianura Padana è aggravato dalla particolare conformazione geografica, che causa uno scarso movimento dell'aria, quindi è difficile diluire le concentrazioni di inquinanti.

Per affrontare il problema, Regioni, Agenzie regionali per l'ambiente, comunità scientifica e Comuni hanno messo e stanno per mettere in atto programmi per ridurre le emissioni di sostanze inquinanti.

Rischio asma. Centralina per il monitoraggio di PM10 a Milano. Questo inquinante atmosferico generato dal traffico e dal riscaldamento delle abitazioni può causare, tra l'altro, asma bronchiale.

Enrico Brandi/Fotogramma

previste dai piani regionali. Accanto a questo progetto catalizzatore ci sono molte iniziative locali, come scelte civiche e progetti di ricerca, portate avanti dalle ARPA e dalle università. E per molte di queste iniziative si vedono già i primi risultati positivi.

Quello che inquina la salute

Come già accennato, tra i principali inquinanti atmosferici ci sono il PM10 e il più pericoloso PM2,5. Si tratta di sostanze prodotte principalmente dalla combustione dei motori a scoppio degli autoveicoli, dall'usura di freni e pneumatici e dal riscaldamento domestico – combustione della biomassa legnosa delle stufe a legna o a pellet – e industriale, centrali per la produzione di energia comprese.

Uno studio dell'ARPA Lombardia ha stimato che nel 2014 il 44 per cento delle emissioni di PM10 a livello regionale proveniva dal settore del riscaldamento e il 25 per cento dal trasporto su strada. Quest'ultimo, in particolare i motori diesel, era responsabile del 53 per cento delle emissioni di biossido di azoto.

L'ultimo rapporto *Mal'Aria 2019* di Legambiente relativo al 2018 ha raccolto i dati delle ARPA regionali e classificato le città italiane in base al numero di giorni in cui la concentrazione di inquinanti registrata dalle centraline ha superato il limite di sicurezza. I numeri parlano chiaro: tutte le città capoluogo di provincia dell'area padana – a eccezione di Cuneo, Novara, Verbania e Belluno – hanno superato almeno uno dei limiti per il PM10 e per l'ozono. Nel 2018, al primo posto per il PM10 troviamo Torino, dove il valore soglia di 35 giorni annui come media di 50 microgrammi per metro cubo (un microgrammo equivale a un milionesimo di grammo) è stato superato in 87 giorni, al secondo Frosinone (unico capoluogo dei primi dieci che non si trova nel Nord Italia) con 83 giorni e al terzo Lodi, con 78 giorni. Seguono Milano (74), Venezia (63), Padova (60), Alessandria (59), Asti (57) Reggio Emilia e Cremona (56), Pavia e Treviso (53). Il gap maggiore rispetto al resto d'Europa si riscontra per le concentrazioni di ozono. Con concentrazioni massime di oltre 140 microgrammi per metro cubo su una media giornaliera di otto ore, siamo ben al di sopra dell'obiettivo a lungo termine per la protezione della salute umana: 120 microgrammi per metro cubo. Nel 2018, fra le città più inquinate troviamo Brescia, che ha superato i valori di 120 microgrammi per metro cubo per 103 giorni, Monza (89 giorni), Lecco (88 giorni), Bergamo (85 giorni), Piacenza (80 giorni), Varese (78 giorni), Alessandria (77 giorni) e Venezia (76 giorni).

C'è una relazione fra valori di ozono elevati e alcune variazioni di inquinanti osservate durante i mesi estivi, soprattutto negli ultimi anni. Si chiama smog fotochimico, ed è l'inquinamento dell'aria che si produce quando ossidi di azoto e composti organici volatili immessi in atmosfera entrano in contatto con la radiazione ultravioletta presente nella luce solare. Questo incontro innesca una serie di processi chimici che portano alla formazione di ozono e di centinaia di altre sostanze, che prendono il nome di inquinanti secondari. Si chiama smog fotochimico proprio perché viene generato da reazioni chimiche catalizzate dalla luce.

Le concentrazioni di particolati dipendono sia dalle emissioni dirette – PM primario – sia dalla formazione di particolato a partire da gas precursori (ammoniaca, ossidi di azoto, biossido di zolfo e composti organici volatili) in seguito a trasformazioni fisicochimiche in atmosfera. In questo caso si parla di PM secondario. Uno studio dell'ARPAE Emilia-Romagna riferito a dati del 2010 stima che la componente secondaria del particolato rappresenti il 70 per cento del totale, e che una tonnellata di ammoniaca emessa porti alla formazione di 170 chilogrammi di PM10, una tonnellata di ossidi di azoto a 230 chilogrammi di PM10, una tonnellata

di biossido di zolfo a 140 chilogrammi di PM10 e una tonnellata di composti organici volatili a 5,5 chilogrammi di PM10.

Secondo l'Agenzia europea dell'ambiente, 3,7 milioni di persone in Nord Italia su circa 27 milioni di residenti sono esposte a concentrazioni di inquinanti che superano i limiti. Gli effetti dell'esposizione massiccia e prolungata a sostanze inquinanti sulla salute di adulti e bambini sono tutt'altro che secondari.

L'impatto si misura anche in termini di salute respiratoria: dispnea, cioè mancanza di fiato, tosse, maggiore probabilità di contrarre l'asma e una correlazione con l'insorgenza di allergie ai pollini. Ma pure in termini di stili di vita, come il rischio di sviluppare malattie croniche, anche non respiratorie, e sulla salute in gravidanza. Lo conferma il rapporto *Air pollution and child health* dell'Organizzazione mondiale della Sanità (OMS) pubblicato a ottobre 2018: l'esposizione all'aria inquinata durante la gravidanza aumenta la probabilità di partorire prematuramente e la probabilità che i bambini abbiano basso peso alla nascita. Incide anche sul neurosviluppo del feto, e dunque sulle capacità cognitive.

Il limite di questo genere di indagine epidemiologiche è che in molti casi si tratta di problemi con un'origine multifattoriale, dove si intrecciano cioè la componente genetica e quella ambientale. Non è sempre facile isolare la responsabilità dell'uno o dell'altro fattore inquinante nell'insorgenza della malattia.

L'esposizione all'aria inquinata durante la gravidanza aumenta la probabilità di parto prematuro e di un basso peso alla nascita

Un nuovo accordo per il Bacino Padano

Nel 2017, vista la gravità della situazione, le regioni del Bacino Padano hanno siglato con il Ministero dell'ambiente un nuovo accordo per il Bacino Padano (il precedente risaliva al 2013). L'accordo prevede una serie di impegni da parte delle regioni, nel solco del Decreto Legislativo n. 155 del 13 agosto 2010 sulla qualità dell'aria in Europa, con l'obiettivo di stabilire nuove misure e divieti in particolare per il settore dei trasporti, dell'agricoltura e della combustione di biomassa per il riscaldamento.

Sempre nel 2017, le stesse regioni si sono unite sotto l'egida del già menzionato PREPAIR. Fino al 2024 il progetto monitorerà in modo coordinato e omogeneo l'attuazione e i risultati delle azioni per la qualità dell'aria nel Bacino Padano. Del progetto fanno parte Emilia-Romagna, Lombardia, Veneto, Piemonte, Provincia Autonoma di Trento, Valle d'Aosta e Friuli-Venezia Giulia, con le relative ARPA, oltre all'Agenzia dell'ambiente della Slovenia, paese che vive problemi di inquinamento simili a quelli della Pianura Padana, i Comuni di Bologna, Milano e Torino, ERVET (Emilia-Romagna valorizzazione economica territorio SpA) e Fondazione Lombardia per l'ambiente. Gli indicatori usati da PREPAIR permetteranno di avere il quadro degli strumenti attivati per mettere in atto politiche, delle risorse finanziarie usate, degli impatti concreti sul territorio e della riduzione di emissioni inquinanti.

In particolare saranno monitorate misure già pianificate dalle Regioni tramite i propri piani per la qualità dell'aria e l'accordo per il Bacino Padano, insieme alle azioni attivate da PREPAIR che riguardano tutti i settori che hanno un impatto: agricoltura, combustione delle biomasse, mobilità, industria ed efficienza energetica del patrimonio immobiliare residenziale e commerciale.

«L'elemento di novità del progetto è capire quanto le singole azioni incideranno nella riduzione delle emissioni inquinanti», spiegano Katia Raffaelli, coordinatrice di PREPAIR, e Marco Deserti, responsabile del Servizio tutela e risanamento acqua, aria e agenti fisici della Regione Emilia-Romagna, capofila del progetto.

Grazie alla modellistica più recente e alla sinergia con le ARPA regionali, gli scienziati che si occupano dell'inquinamento nella Pianura Padana sanno già di quanto potrebbero essere abbattute le emissioni nel complesso, mettendo in atto tutte le strategie previste dall'accordo per il bacino e dai piani regionali e locali. Si stima un abbattimento delle emissioni di biossido di azoto dalle 380.000 tonnellate prodotte nel 2013 alle 230.000 di fine progetto.

«La domanda che ci poniamo ora – continuano Raffaeli e Deserti – è la seguente: questa riduzione è sufficiente per rientrare nei limiti comunitari? Una volta che avremo una risposta sull'efficacia di ognuna delle azioni che metteremo in atto sarà più semplice fornire ai decisori politici strumenti definitivi di azione. Nel caso in cui dovessimo giungere alla conclusione che anche mettendo in atto tutte le politiche presenti nei piani non si riuscirà a rientrare nei limiti di sicurezza, il progetto prevede comunque una parte di ricerca per il costante aggiornamento dei piani in corso».

Il progetto prevede tra l'altro una consistente parte di formazione rivolta ai decisori e alla popolazione come sostegno all'attuazione delle direttive dei piani. È fondamentale «la relazione fra il consorzio PREPAIR e i fondi strutturali dell'Unione Europea», specifica Raffaelli. «Un esempio di questa sinergia sono le misure di copertura per le vasche di stoccaggio dei liquami, per ridurre le emissioni di ammoniaca».

Il piano della Lombardia

Nel corso degli anni, le Regioni e le città del Bacino Padano entrate a far parte di PREPAIR si sono dotate di piani regionali per rispondere al Decreto Legislativo n. 155 del 13 agosto 2010. La Regione Lombardia ha predisposto un *Piano regionale degli interventi per la qualità dell'aria* (PRIA) aggiornato nel 2018.

«Gli scenari ottenuti con modelli basati sui dati in nostro possesso mostrano che con le azioni previste dal PRIA nella Regione Lombardia le concentrazioni di particolato e di biossido di azoto riescono a rientrare nei limiti previsti dalla normativa europea e nazionale», spiega Guido Lanzani, dirigente dell'Unità organizzativa per la qualità dell'aria di ARPA Lombardia. «Senza il PRIA, nel 2030 in Lombardia per i particolati si stimano riduzioni delle emissioni del 17 per cento rispetto al 2015, mentre con il PRIA alla stessa data potremo avere riduzioni del 48 per cento per il PM2,5 e del 44 per cento per il PM10».

Oltre a un 25 per cento in meno di emissioni di monossido di carbonio (CO) e a un 26 per cento in meno di ammoniaca, contro una riduzione del 2 per cento prevista invece dallo scenario senza le misure previste dal PRIA aggiornato.

Oltre al progetto PREPAIR, Regione Lombardia e ARPA regionale sono attive con il progetto Supersiti, per monitorare i parametri chimici, fisici e tossicologici delle particelle inquinanti presenti in atmosfera, come la misurazione di nero di carbonio (meglio noto come nerofumo), ioni, idrocarburi policiclici aromatici (IPA) e altre specie chimiche prodotte per esempio dal traffico. Un esempio è la determinazione del composto organico levoglucosano. Questo marcatore è rilevato in alte concentrazioni nel particolato fine che proviene dalla combustione di materiali organici vegetali.

Oltre i limiti

In questa mappa sono indicate alcune delle città che hanno superato almeno uno dei limiti giornalieri previsti per il PM10 o per l'ozono nel 2018. In rosso i giorni totali di superamento delle città in cui si è registrato il superamento sia dei limiti di PM10 sia dell'ozono. In blu i giorni di superamento del limite previsto per l'ozono (25 giorni all'anno).

Danilo Sossi; fonte: dossier *Mal'aria di città 2019*, Legambiente, elaborazione su dati ARPA o Regioni; bgblue/iStock (*Italia*)

Le iniziative di citizen science

Livello di NO_2 medio mensile rilevato a Milano dal 2 febbraio al 2 marzo 2018

Una collaborazione fra scienziati e società civile con un obiettivo: raccogliere dati per mappare la concentrazione di inquinanti, strada per strada, ma anche per fare pressione sulle istituzioni affinché si impegnino con costanza sul tema dell'inquinamento dell'aria. Questi gli obiettivi di due iniziative di *citizen science* del Bacino Padano: Cittadini per l'Aria a Milano e Aria Pesa a Bologna.

Cittadini per l'Aria è da tempo impegnata in campagne per il rilevamento delle concentrazioni di biossido di azoto fuori dalle scuole. La campagna *NO2? No, grazie* ha coinvolto 157 scuole e 39 parchi gioco e giardini in città, evidenziando che più della metà di scuole e parchi supera i limiti di legge per le concentrazioni annue di biossido di azoto. Usando i dati raccolti dai cittadini e un sistema di apprendimento automatico, un gruppo di ricercatori del Dipartimento di epidemiologia del servizio sanitario della Regione Lazio ha costruito la mappa della diffusione del biossido di azoto anche nei punti non direttamente campionati.

Un'esperienza simile è stata condotta dalla rete civica Aria Pesa, composta da associazioni e comitati di cittadini bolognesi, che ha prodotto la campagna *Pesa L'Aria*, pubblicando la prima mappa partecipata sull'inquinamento da biossido di azoto. Dal progetto sono emersi dati critici anche nelle aree in prossimità delle scuole di Bologna. Aria Pesa ha elaborato i dati raccolti da 317 campionatori: per il 53 per cento è stato superato il limite di sicurezza. La seconda campagna, *Quanto è pesa l'aria a scuola?*, rivolta specificatamente alle scuole, ha visto campionatori all'opera nel 70 per cento delle scuole bolognesi, rivelando che oltre il 40 per cento hanno concentrazioni di biossido di azoto critiche a cui sono esposti 17.380 studenti, 7000 dei quali hanno meno di dieci anni di età.

Il progetto Ammoniaca, infine, monitora la presenza di ammoniaca nel settore agricolo. In particolare, il progetto individua le azioni possibili per migliorare gestione e stoccaggio di ammoniaca con silos come bioreattori che tra l'altro trasformano il refluo in metano, da mettere eventualmente in commercio, e in digestato, che altro non è che un biofertilizzante ottenuto come sottoprodotto degli impianti di biogas e che, trattato in modo opportuno, contribuisce a ridurre le emissioni.

Milano città elettrica entro il 2030

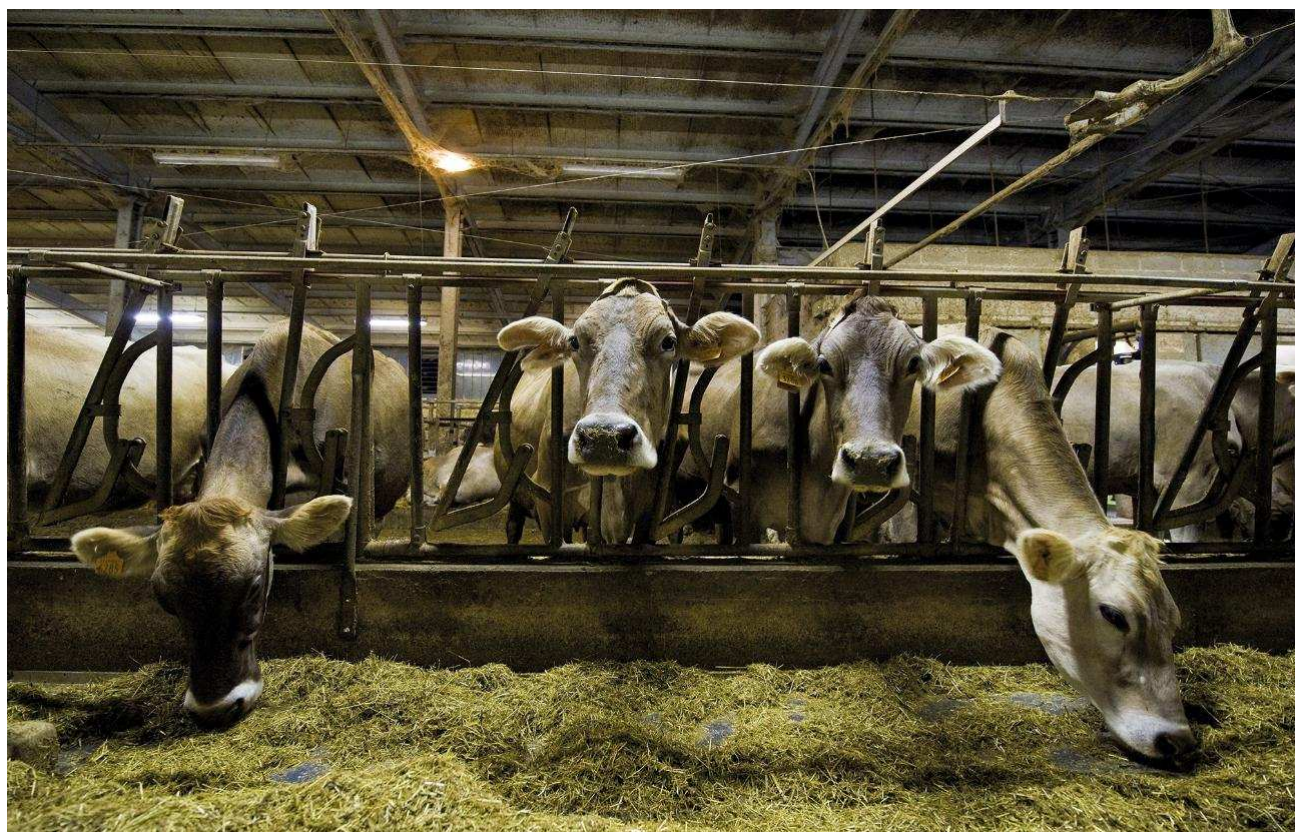
Nella riduzione delle emissioni inquinanti, il Comune di Milano è all'avanguardia. Innanzitutto grazie al progetto Area B per il periodo 2019-2030, a oggi unico nel suo genere in Europa. Si tratta di una zona a traffico limitato che coincide con gran parte del territorio della città, dove vige il divieto di accesso e circolazione per i veicoli più inquinanti oltre a quelli con lunghezza superiore ai 12 metri che trasportano merci.

Secondo le stime, grazie ad Area B già nel 2019 le emissioni di PM10 in città diminuiranno del 14 per cento rispetto al 2018, per arrivare una diminuzione del 21 per cento nel 2020 e del 24 per cento nel 2021. Nei primi quattro anni, dal 2019 al 2022, le emissioni di PM10 dovrebbero dimezzarsi. Per gli ossidi di azoto l'accelerazione avverrà invece tra il 2023 e il 2026, con una diminuzione dell'11 per cento all'anno, mentre fra il 2019 e il 2022 la diminuzione sarà del 5 per cento all'anno.

Un rapporto di Cittadini per l'Aria ONLUS pubblicato nel febbraio 2019 e realizzato dalla società di modellistica ambientale ARIANET grazie al sostegno di ClientEarth, un'organizzazione no profit che si occupa di legislazione ambientale, ha mostrato che se si vietasse la circolazione a tutti i veicoli diesel fino agli Euro 5 inclusi, il 95 per cento del territorio milanese rispetterebbe il valore limite relativo alla concentrazione media annuale di biossido di azoto, pari a 40 microgrammi per metro cubo.

«Possiamo affermare che di strada ne sia stata fatta molta rispetto a vent'anni fa, ma tanta è quella ancora da fare», racconta Gloria Zavatta, amministratore dell'Agenzia mobilità ambiente e territorio (AMAT) del Comune di Milano. Area B arriva alla fine di cinque anni di sperimentazione di Area C 2012-2017, una zona del centro storico di Milano con restrizioni di accesso per veicoli con lunghezza superiore a 7,50 metri, mezzi destinati al trasporto di cose, limitatamente alla fascia oraria compresa tra le 8.00 e le 10.00, in relazione alle prestazioni ambientali dei veicoli. «Con Area C il traffico è diminuito del 30 per cento, il numero di incidenti del 28 per cento e il numero di veicoli inquinanti del 49 per cento. Il PM10 allo scarico è diminuito del 19 per cento, gli ossidi di azoto del 10 per cento, la CO_2 del 22 per cento. Ma non basta: il 21 febbraio 2019 è già stato raggiunto il limite di 35 giorni di superamento dei valori soglia per il PM10. I nostri monitoraggi mostrano che attualmente il 90 per cento delle automobili di Milano è parcheggiato, solo il 10 per cento circola. Abbiamo elaborato stime sulla reale circolazione delle auto per capire di quanto abbatteremmo le emissioni in questo modo e i risultati mostrano che si tratta di una strada percorribile».

Milano fa inoltre parte della rete C40 insieme ad altre 100 città del mondo impegnate contro il cambiamento climatico, «innanzitutto togliendo dalla circolazione i mezzi di trasporto pubblici a

Cortesia Cittadini per l'Aria (*mappa*)

Particolato animale. Un allevamento di vacche in Lombardia. Questa attività può generare ammonica che a sua volta interviene nella formazione del particolato, con conseguenze sulla salute umana. I piani per la qualità dell'aria prevedono l'abbattimento di queste emissioni.

combustibili fossili», continua Zavatta. «Finora abbiamo coordinato riunioni di lavoro, e in molti sono venuti a Milano a condividere con noi le buone pratiche internazionali», prosegue Zavatta. L'obiettivo per il 2030, spiega l'amministratore di AMAT, è portare Milano a essere la prima città italiana completamente elettrica come trasporto pubblico, con 1200 bus elettrici entro il 2030 e 200 già entro il 2020 (il 15 per cento del totale), oltre ad avere un parco auto più salubre e numericamente inferiore. «Nel giro di dieci anni i mezzi ATM consumeranno 30 milioni di litri di gasolio all'anno in meno, e la produzione di anidride carbonica si ridurrà di quasi 75.000 tonnellate all'anno».

La strategia dell'Emilia-Romagna

L'Emilia-Romagna ha un suo piano regionale per l'aria 2015-2020, indicato con la sigla PAIR, che prevede un investimento di 300 milioni di euro soprattutto per ridurre le emissioni di PM10, ossidi di azoto e precursori di particolato e ozono, particolarmente elevate sul territorio. Meno traffico e più aree verdi, piste ciclabili e percorsi pedonali nelle città, risorse investite per il trasporto pubblico con un parco autobus rinnovato, eco-incentivi per rottamare i veicoli commerciali leggeri e i mezzi privati più inquinanti e per la promozione della mobilità elettrica, oltre alla regolamentazione dell'uso di biomasse, la promozione dell'efficienza energetica e di misure per la riduzione delle emissioni di ammoniaca da agricoltura e allevamenti. Il piano prevede di rientrare nei limiti europei sostanzialmente su tutto il territorio regionale e di diminuire dal 64 per cento all'1 per cento la popolazione esposta alle conseguenze del superamento del valore limite del PM10.

«Oltre a PREPAIR siamo stati promotori a livello regionale del progetto Supersito, il cui principale obiettivo è stata la crescita di conoscenza sugli aspetti chimici, fisici, tossicologici e sanitari dell'aerosol atmosferico», spiega Vanes Poluzzi, responsabile dei Centri tematici regionali per la qualità dell'aria e aree urbane di ARPAE Emilia-Romagna. «La ricerca sistematica di carbonio organico ed elementare, ioni, metalli e altri composti ed elementi, fino alle particelle di pochi nanometri di diametro e a diversi parametri tossicologici, unita all'impiego di modelli deterministici e statistici, hanno portato a quantificare le sorgenti di emissioni e alla comprensione di alcuni fenomeni osservati. Inoltre gli aspetti tossicologici ed epidemiologici, questi ultimi hanno considerato anche dati di tipo sanitario, costituiscono la base per le valutazioni in corso degli impatti sulla salute».

Il contenimento delle emissioni in Veneto

Anche Regione Veneto e ARPA Veneto (ARPAV) hanno messo in campo un *Piano regionale di tutela e risanamento dell'atmosfera* (PRTRA) con precise misure di contenimento delle emissioni e una rete per il controllo e il monitoraggio della qualità dell'aria. «In Veneto le principali fonti di inquinanti sono il traffico e la combustione delle biomasse, a cui si aggiunge il settore agricolo con la produzione di ammoniaca che produce PM secondario», spiega Salvatore Patti, della direzione tecnica di ARPAV.

Per quanto riguarda il traffico, il Veneto ha stabilito tre livelli di allerta: normalmente vige la limitazione fino agli Euro 3 diesel dalle 8.30 alle 18.30 da lunedì a venerdì, insieme al divieto di uso di impianti di riscaldamento domestico alimentati a biomasse classi-

Yoko Aziz/AGF

ficati a una stella nel quadro della certificazione nazionale di questi impianti (il massimo è cinque stelle). Se si eccedono i quattro giorni consecutivi di superamento dei valori, il bollino che indica i livelli di allerta per i PM10 passa da verde ad arancione e il divieto di circolazione si estende a tutti i giorni della settimana e agli Euro 4 diesel non commerciali. Se il bollino diventa rosso (il terzo e ultimo di tre livelli di allerta), si devono fermare anche i veicoli Euro 4 diesel commerciali. A ogni sindaco spetta la decisione di restringere i divieti nel proprio comune. «La situazione è tutt'altro che rosea, dal momento che il Veneto è una grande città diffusa, con centri abitati molto vicini fra loro», continua Patti. «I blocchi imposti alle città con oltre 30.000 abitanti servono a poco se fra una di queste città e l'altra vi sono tanti altri centri più piccoli che non devono sottostare alle limitazioni».

L'inquinamento può arrivare anche dal mare, a causa delle emissioni prodotte dalle imbarcazioni. In questo senso l'Università Ca' Foscari di Venezia ha attivato Ecomobility, un progetto europeo della durata di 18 mesi, in collaborazione con la Regione Veneto e l'Istituto di scienze dell'atmosfera e del clima del Consiglio nazionale delle ricerche. «L'obiettivo è promuovere l'innovazione nella gestione dei principali mezzi di trasporto nelle aree costiere, usando un approccio eco-compatibile», racconta Andrea Gambaro, professore di chimica analitica all'ateneo veneziano e responsabile del progetto. «Stiamo mettendo a punto uno strumento di sostegno per il sistema di gestione del traffico che permetterà di organizzare il flusso dei veicoli in base alla concentrazione di inquinanti, riducendo i picchi di inquinamento nelle aree già critiche». Il sistema raccoglie i dati ambientali dalle stazioni di monitoraggio distribuite nell'area urbana e trasmette le informazioni in tempo reale, sotto forma di mappe, agli organi di gestione del traffico. Ecomobility avrà una parte dedicata al contributo del traffico navale e delle altre fonti di inquinamento sulle nanoparticelle.

«Attualmente non abbiamo sperimentazioni in corso per il comparto agricolo e il riscaldamento», aggiunge Patti. «Ma è stato importante aver aderito a PREPAIR che prevede politiche supplementari anche in agricoltura, come la copertura delle vasche per lo stoccaggio dei liquami, l'uso di fertilizzanti a basso contenuto di urea e l'abbattimento dell'uso di biomassa. Per quanto riguarda le biomasse abbiamo condotto un sondaggio telefonico e via Web per chiedere ai cittadini come riscaldano le proprie abitazioni e vi sono zone, come la parte montana della regione, dove addirittura l'80 per cento delle case è riscaldato con combustione di biomassa», conclude.

C'è una valida alternativa verde alla combustione di biomassa? Politecnico di Torino e Iren S.p.A., azienda che opera nel settore della produzione e distribuzione di energia elettrica, e nei servizi di teleriscaldamento, hanno in corso un progetto di ricerca proprio sui benefici del teleriscaldamento in relazione alle emissioni inquinanti. Al posto di una caldaia situata nell'edificio, un sistema di teleriscaldamento prevede un collegamento a una centrale termica tramite una rete di tubature interrate. In questi tubi scorre acqua calda che viene raccolta in ogni struttura, per esempio un palazzo, attraverso uno scambiatore che distribuisce il calore verso i radiatori presenti nelle abitazioni.

«L'effetto della sostituzione delle caldaie a Torino è evidente, tanto che stiamo facendo le medesime valutazioni anche a Parma, Reggio Emilia, Asti e Piacenza», spiega Maria Chiara Zanetti, professoressa del Dipartimento di ingegneria dell'ambiente, del territorio e delle infrastrutture del Politecnico di Torino. Il consumo di energia primaria, cioè l'energia estratta o ricavata direttamen-

Valori medi annuali di PM10, 2017

I valori sono espressi in microgrammi per metro cubo. Per l'OMS il valore soglia è 40. In grigio le città del Bacino Padano.

Avellino	42
Torino	41,9
Cremona	41,5
Padova	40,1
Milano	39,8
Alessandria	39,5
Monza	39
Brescia	38
Lodi	38
Pavia	38
Mantova	37,3
Vicenza	37,3
Venezia	37
Bergamo	36,5
Treviso	36,5
Rovigo	36
Parma	35,5
Vercelli	35,5
Modena	35,3
Como	34
Piacenza	34
Asti	33,5
Terni	33
Verona	32,3
Ferrara	32,2
Frosinone	32
Pesaro	31,2
Rimini	30,5
Palermo	30,2
Varese	29
Benevento	28
Lecco	28
Ravenna	28
Roma	27,5
Napoli	27,4
Biella	27,3
Lucca	27
Bologna	27
Caserta	26,3
Crotone	26
Cuneo	26
Pordenone	26
Pescara	25,5
Siracusa	25,4
Ancona	25,1
Catania	25
Forlì	25
Caltanissetta	24,9
Pisa	24,5
Sondrio	24,5

Prato	24,5
Trento	24
Bari	23,8
Cagliari	23,6
Latina	23
Udine	23
Genova	22,4
Salerno	22,3
Chieti	22
Firenze	22
Foggia	22
Perugia	22
Ragusa	22
Brindisi	21,7
Arezzo	21,5
Belluno	21,5
Lecce	21,5
Savona	21,3
Oristano	21
Sassari	21
Siena	21
La Spezia	21
Vibo Valentia	20,9
Grosseto	20,5
Livorno	20,5
Messina	20,5
Teramo	20,5
Trieste	20,4
Aosta	20
Bolzano	20
Cosenza	20
Pistoia	20
Rieti	20
Taranto	20
Potenza	19,4
Reggio Calabria	19,2
Ascoli Piceno	19
Gorizia	19
Imperia	19
Isernia	19
Trapani	19
Catanzaro	18,9
Verbania	18
Viterbo	18
Agrigento	17
Campobasso	17
Massa	16,9
L'Aquila	16,3
Macerata	16,2
Enna	14,3

Fonte: *Ecosistema Urbano 2018*, Legambiente

Misura cruciale. Il potenziamento delle linee delle metropolitane, e in generale dell'offerta per la mobilità pubblica, è fondamentale per ridurre le emissioni di inquinanti atmosferici.

Chetan Vlad/iStock

te da risorse naturali, e le emissioni di inquinanti totali sono significativamente ridotte rispetto a uno scenario tradizionale, spiega Zanetti. «La concentrazione media al suolo di ossidi di azoto, particolato e anidride carbonica viene ridotta rispetto all'uso di impianti termici de centralizzati, comportando a sua volta minori costi esterni legati agli effetti sulla salute», conclude.

Il piano appena approvato in Piemonte

Il piano regionale del Piemonte per la qualità dell'aria è stato approvato da poco. «Si articola in tutti i settori individuati dal piano di Bacino Padano e abbiamo come obiettivo capire il ruolo e il peso di ogni sorgente emissiva nella composizione dell'inquinamento a livello regionale», racconta Secondo Barbero, direttore del Dipartimento rischi naturali e ambientali di ARPA Piemonte. «Un tema per noi importante è quello del teleriscaldamento. Torino è molto ben teleriscaldata, con ottimi risultati in termini di emissioni da biomassa, ma non possiamo dire lo stesso del resto della regione».

Accanto a questo, le misure politiche del piano riguardano i trasporti nella direzione del potenziamento della linea metropolitana e del sistema ferroviario, l'aggiornamento del parco veicoli e la promozione dello *smart-working* per ridurre gli spostamenti non necessari specialmente con auto privata. «I nostri modelli, che riescono a fare previsioni su tutto il territorio chilometro quadrato per chilometro quadrato, mostrano che entro il 2030 possiamo rientrare nei valori soglia di sicurezza per particolati e ossidi di azoto, sia come media annua che come numero di giorni di superamento», conclude Barbero.

Che aria respiri?

Non va dimenticato che emissioni e inquinamento respirato sono due aspetti diversi dello stesso problema, e un interessante ambito di ricerca che prende piede riguarda l'impatto delle barriere vegetali a bordo strada per mitigare l'esposizione della popolazione agli inquinanti. «In viale Fulvio Testi, a Milano, l'Università degli Studi di Milano-Bicocca sta mettendo a punto un progetto di messa a dimora di barriere vegetali (alberi) fra la strada e la pista ciclabile per ridurre la quota di polveri sottili respirate», racconta Ezio Bolzacchini, professore di chimica ambientale dell'ateneo.

Un'iniziativa simile è in corso anche a Bologna, nell'ambito del progetto iSCAPE di Horizon 2020. «Stiamo studiando quanto il potenziamento dei viali alberati in zone particolarmente esposte agli inquinanti possa aumentare la ventilazione delle strade abbattendo le concentrazioni di particolati e di ossidi di azoto. I risultati sono incoraggianti – spiega Silvana Di Sabatino, professoressa dell'Università di Bologna e coordinatrice del progetto – anche se, accanto a queste misure, sarà ugualmente fondamentale lavorare per la sostituzione del parco mezzi pubblici a metano, passando all'elettrico».

Sempre a Bologna e sempre all'interno di iSCAPE è in corso una sperimentazione innovativa sull'uso delle vernici fotocatalitiche, che grazie all'azione dei raggi solari accelerano le reazioni chimiche di interesse, per abbattere le concentrazioni di inquinanti. «Abbiamo ottenuto riduzioni del 10-20 per cento nelle concentrazioni di ossidi di azoto, ma gli effetti sono locali e dipendono dalle condizioni atmosferiche e dalla geometria degli edifici, e a basso costo, dal momento che le vernici catalitiche costano poco».

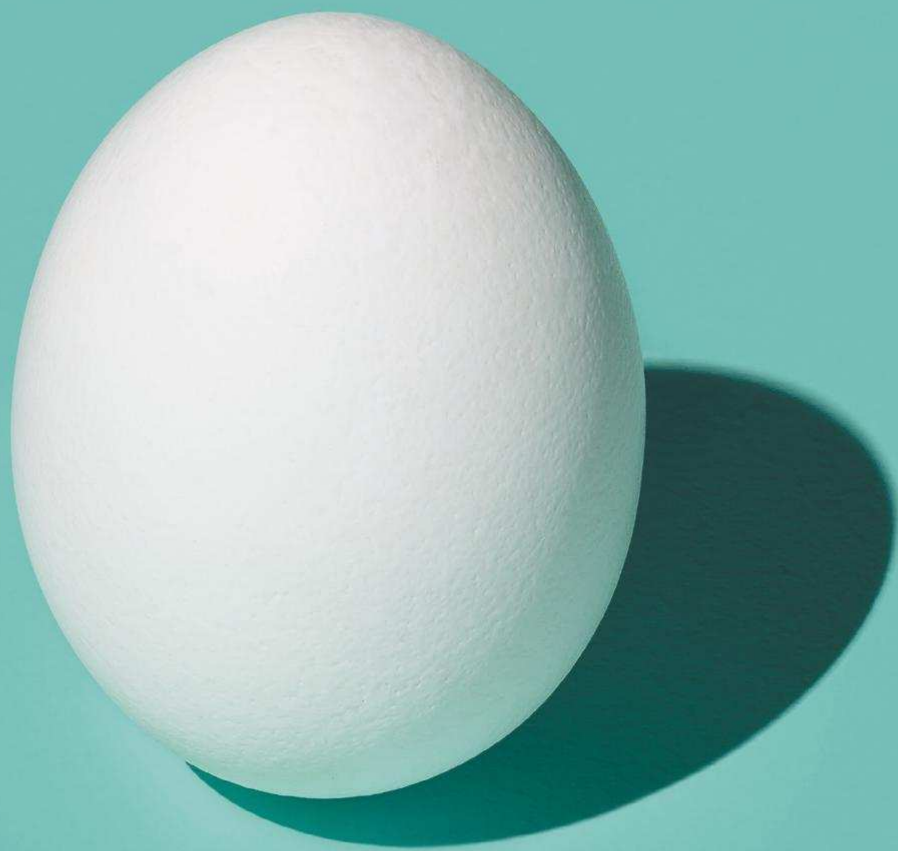
Nonostante i passi avanti degli ultimi anni non possiamo ancora dire di aver tracciato la strada definitiva per far rientrare il Bacino Padano nei limiti di sicurezza per l'inquinamento dell'aria. Nei prossimi anni sarà la ricerca a dirci quanto ogni singola azione avrà un impatto sull'aria che respiriamo. Nel frattempo, possiamo dire che i mattoni per lastricare questa strada sono pronti e che tutte le parti coinvolte, dalle regioni alle università, dalle agenzie regionali per l'ambiente fino ai piccoli comuni e ai cittadini stessi, si rendono conto di quanto sia fondamentale agire in fretta. ■

PER APPROFONDIRE

La prima indagine sulla percezione della qualità dell'aria da parte dei cittadini a livello di bacino del Po, progetto PREPAIR, luglio 2019: **http://www.lifeprepair.eu/wp-content/uploads/2019/07/E2D1_Valuta_lAria_Rapporto_completo.pdf.**

SENTIERI - Studio epidemiologico nazionale dei territori e degli insediamenti esposti a rischio da inquinamento. Quinto Rapporto. Autori vari, in «Epidemiologia e Prevenzione», 2019. **http://www.epiprev.it/pubblicazione/epidemiol-prev-2019-43-2_3-Suppl1.**

L'Ufficio regionale europeo dell'Organizzazione mondiale delle Sanità su ambiente e aria: **www.euro.who.int/en/health-topics/environment-and-health/air-quality.**

BIOTECNOLOGIE

Tutti i dati del mondo in un uovo

Il DNA è usato per immagazzinare e generare informazioni su scala infinitesima ma anche su scale estremamente grandi

di James E. Dahlman

Miliardi di anni prima che gli uomini inventassero il disco rigido, l'evoluzione scelse il DNA per immagazzinare le sue informazioni più preziose: quelle genetiche. Nel tempo, il DNA è diventato tanto bravo a farlo da essere usato da tutte le forme di vita conosciute del pianeta. Grazie ai recenti progressi tecnologici che ci permettono di «leggere» e «scrivere» facilmente le catene di DNA, ora gli scienziati stanno sfruttando questa antichissima molecola per immagazzinare informazioni di nuovo tipo: quelle che gli esseri umani stanno generando a ritmi esponenziali nell'epoca dei *big data*.

IN BREVE

Il DNA ha molte proprietà che lo rendono ideale per immagazzinare informazioni, e non solo quelle genetiche. Ma non è ancora in grado di sostituire i tradizionali dispositivi elettronici come i dischi rigidi.

Con il miglioramento dei metodi di sequenziamento, però, settori come l'ingegneria chimica stanno usando il DNA come registratore molecolare, e ciò consente ai ricercatori di produrre nuovi dati con velocità senza precedenti.

In questo modo, il DNA è usato sia per «leggere» che per «scrivere» le informazioni. È un progresso che potrebbe avere importanti implicazioni nell'accelerare lo sviluppo dei farmaci e nel trattamento delle malattie.

Fotografia di Dan Saelinger

L'idea è di sfruttare il DNA per immagazzinare altre informazioni oltre a quelle genetiche. Dopo tutto i bit – 1 e 0 – dei computer stanno già arrivando ai limiti imposti dalla fisica. Un aspetto della sfida di immagazzinare in modo sicuro tutti i dati che stiamo producendo è venuto recentemente alla ribalta quando Myspace – a suo tempo il più popolare dei social network – ha annunciato che i dati di un intero decennio di funzionamento potevano essere andati irrimediabilmente perduti in un'operazione di migrazione dei server. La protezione a lungo termine dei dati, come quando si riavvia un sito web dopo un periodo di quiescenza, rivela che in certi punti le attuali tecnologie sono vulnerabili e macchinose. E non è solo un problema di spazio: conservare i dati richiede quantità significative di energia.

Le proprietà del DNA potrebbero consentire di aggirare questi limiti. Anzitutto la struttura a doppia elica del DNA è perfetta per immagazzinare informazioni perché conoscendo la sequenza di un filamento si ricava automaticamente quella dell'altro. Inoltre, il DNA è stabile per lunghi periodi, il che significa che può mantenere l'integrità e l'esattezza delle informazioni. Nel 2017, per esempio, è stato analizzato DNA isolato da resti umani vecchi di 8100 anni, che non erano neppure rimasti in condizioni ideali per tutto questo tempo. Se tenuto in ambiente fresco e secco, il DNA può quasi certamente durare per decine di migliaia di anni.

La caratteristica forse più convincente della doppia elica, però, è che può ripiegarsi in una struttura straordinariamente densa. Come riferimento, ogni cellula umana ha un nucleo del diametro di circa 0,01 millimetri, ma il DNA che contiene, completamente dipanato, è lungo 2 metri. In altre parole, se tutto il DNA di una persona fosse saldato insieme arriverebbe a 100 miliardi di chilometri. Nel 2014 è stato calcolato che è teoricamente possibile immagazzinare 455 exabyte di dati in un solo grammo di DNA. Una densità di stoccaggio delle informazioni circa un milione di volte più alta di un disco rigido.

Il DNA è stato usato per elaborare terapie geniche più sicure e accelerare lo sviluppo di farmaci

Anche se l'idea del DNA come supporto di memoria è diffusa da tempo, vi sono ancora significativi ostacoli scientifici, economici ed etici da superare prima che possa sostituire i tradizionali dischi rigidi. Nel frattempo però il DNA si sta già rendendo utile come tecnologia dell'informazione intesa in senso più ampio. È stato usato, per esempio, per registrare film di Hollywood, conservando così i classici in stringhe genetiche invece che in delicati microfilm. Più di recent, è stato usato come strumento per elaborare terapie geniche più sicure e accelerare lo sviluppo di farmaci contro il cancro, e persino per dare per la prima volta, forse, una sorta di «streaming dal vivo» di un organismo vivente. Alla frontiera di questo campo in continua evoluzione, si lavora sul DNA non solo per immagazzinare dati a lungo termine ma per facilitare la produzione di dati a velocità senza precedenti. Questo perché il DNA è più scalabile di ogni altra molecola, in entrambe le direzioni: consente di accrescere in misura spettacolare la quantità di dati che produciamo e di ridurre le risorse necessarie per conservarli.

Nuove nanoparticelle, più rapidamente

Negli ultimi anni gli scienziati hanno usato sempre più spesso il DNA come «registratore» molecolare per seguire e capire i propri risultati sperimentali. In molti casi il procedimento richiede «codici a barre» a DNA: per etichettare e seguire i risultati dei singoli esperimenti, gli scienziati usano come etichette sequenze note di DNA. Per esempio, uno degli esiti sperimentali potrebbe essere associato alla sequenza ACTATC, un altro a TCTGAT e così via.

James E. Dahlman è *assistant professor* presso il Wallace H. Coulee Department of Biochemical Engineering del Georgia Institute of Technology e alla Emory University. Il suo laboratorio lavora nelle aree di confine tra somministrazione di farmaci, nanotecnologie, genomica e modifica mirata dei geni.

Di codici a barre a DNA si parla fin dai primi anni novanta, quando Richard Lerner e Sidney Brenner lo proposero per tenere traccia delle reazioni chimiche. Era un concetto straordinariamente innovativo, ma in anticipo sui tempi: le tecnologie in grado di leggere rapidamente e a basso costo il DNA non erano ancora state sviluppate. Il potenziale dell'idea si è concretizzato solo dopo che molti scienziati, con i loro contributi alla chimica dei nucleotidi, alla microfluidica e ad altre discipline, resero possibile l'avvento del cosiddetto sequenziamento di nuova generazione. Un decisivo progresso si realizzò nel 2005, con l'annuncio che erano stare analizzate 25 milioni di basi del DNA in un esperimento durato quattro ore.

Il sequenziamento di nuova generazione ha avuto altri rapidi progressi; oggi è facile leggere milioni di sequenze di DNA contemporaneamente, il che vuol dire che si possono eseguire e analizzare simultaneamente milioni di esperimenti. Analizzare gli esperimenti con codice a barre a DNA mediante sequenziamento di nuova generazione è una forma di *data management* a sé stante: invece di mettere alla prova un'idea alla volta, gli scienziati possono formulare 20.000 predizioni e verificarle tutte insieme.

I biologi stono stati i primi a sfruttare ampiamente i codici a barre a DNA. Man mano che la tecnica diventa più accessibile, ricercatori di campi diversi, come l'ingegneria chimica e la scienza dei materiali, la stanno usando per fare esperimenti su scala mai vista. Nel mio laboratorio, per esempio, sono in uso codici a barre a DNA per migliorare disegno e funzionalità di nanoparticelle che possano trasportare in sicurezza i farmaci alle cellule malate. Può sembrare che la nanotecnologia, che si basa soprattutto su ingegneria chimica e fisica, non abbia nessun rapporto con il DNA. Ma se si considera il DNA un mezzo per tracciare e immagazzinare dati d'ogni tipo, la sua utilità come strumento organizzativo diventa chiara.

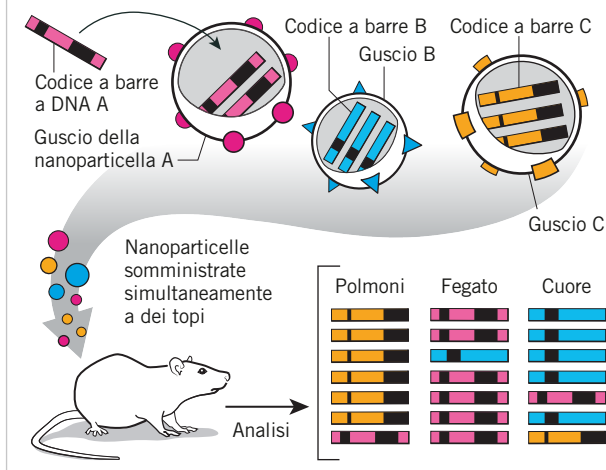
Uno dei problemi fondamentali delle nanotecnologie è che progettare esperimenti con cui cercare terapie efficaci è tuttora assai più facile che eseguirli e analizzare i risultati. Ciò perché forma, dimensioni, carica, composizione chimica e molte altre variabili delle singole nanoparticelle possono alterarne la capacità di somministrare i farmaci genetici alle cellule malate. Questi fattori, inoltre, interagiscono tra loro, e ciò rende veramente difficile predire quali nanoparticelle porteranno fino al bersaglio il proprio farmaco nel modo più mirato. Una soluzione sarebbe valutare le singole nanoparticelle a una a una. Ma i dati delle aziende farmaceutiche che hanno sviluppato nanoparticelle per farmaci a RNA mostrano che spesso questo tipo di test costa diverse centinaia di milioni di dollari.

È qui che la capacità di immagazzinare dati del DNA può con-

TEST IN VELOCITÀ

Un codice a barre per le nanoparticelle

I codici a barre a DNA consentono di testare con efficienza le nanoparticelle progettate per somministrare i farmaci. Le procedure precedenti erano laboriose e lente; ora si possono provare centinaia di tipi di nanoparticelle alla volta. Nella fase di test, illustrata qui sotto, si pone un codice a barre unico in ciascuno dei possibili tipi di guscio delle nanoparticelle (1) che da ultimo serviranno a portare i farmaci alle cellule malate. Nel test sperimentale si somministrano contemporaneamente molte nanoparticelle diverse (2). Poi si cercano nei tessuti i codici a barre, per vedere quali nanoparticelle riescono a entrare più o meno bene in ciascun tessuto dell'organo (3), il che aiuta a stabilire rapidamente quale tipo di nanoparticelle è il più adatto per le varie esigenze di somministrazione dei farmaci e per minimizzare gli effetti collaterali indesiderati.

Illustrazione di Jen Christiansen; fonte: a Direct Comparison of in Vitro and in Vivo Acid Delivery mediated by Hundreds of Nanoparticles Reveals a Weak Correlation. Kalina Paunovska e altri in «Nano Letters», vol. 18, N. 1, 14 Marzo 2018

sentire grandi passi avanti. Per aumentare il numero di nanoparticelle che riusciamo a mettere alla prova possiamo disegnarne migliaia, di diversa struttura chimica – grosse sfere con carica positiva o piccoli triangoli privi di carica, per esempio – e assegnare a ciascuna di esse un suo codice a barre a DNA. La nanoparticella 1, con struttura chimica 1, porta il codice a barre a DNA 1; la nanoparticella 2, con struttura chimica 2, porta il codice a barre a DNA 2; e si ripete più volte questo tipo di marcatura, ottenendo così tante nanoparticelle diverse, ciascuna con la sua propria specifica etichetta di DNA. A questo punto possiamo somministrare centinaia di queste nanoparticelle alle cellule malate. Per identificare le nanoparticelle che sono riuscite meglio a far arrivare i farmaci nelle cellule, poi, basterà sequenziare il DNA e quantificare i loro codici a barre.

La scala di questi esperimenti è del tutto nuova per la nanomedicina. Nel mio campo, un esperimento «tradizionale» ci dà da uno a cinque dati. Entro la fine del 2019 il mio laboratorio spera di quantificare la capacità di veicolare terapie geniche di 500 diverse nanoparticelle in 40 diversi tipi cellulari. Il che equivale a fare 20.000 esperimenti contemporaneamente.

Di conseguenza abbiamo anche dovuto creare una filiera di analisi dei dati che potesse monitorare la qualità di quei dati e insieme aiutarci a sottoporre i risultati a test statistici. Anzitutto, abbiamo verificato quanto bene i risultati di una replica di un esperimento servissero a prevedere quelli di un'altra. Verificato che i nostri grossi *data set* erano affidabili, abbiamo usato i metodi statistici per capire se certi caratteri delle nanoparticelle – per esempio le dimensioni – influenzavano la capacità di portare i farmaci ai tessuti bersaglio. Abbiamo trovato che questa capacità dipende dalla natura chimica delle nanoparticelle, non dalle dimensioni. Grazie a questo approccio speriamo di scoprire terapie geniche sicure più rapidamente e usando assai meno risorse. Uno dei nostri obiettivi è identificare una nanoparticella che possa somministrare specificamente terapie geniche che aiutano a uccidere i tumori, riducendo così gli effetti indesiderabili, come nausea e caduta dei capelli, che accompagnano le terapie attuali.

Abbiamo già avuto qualche successo. Nel 2018, grazie ai vastissimi data set ottenuti da esperimenti con codice a barre a DNA, abbiamo rapidamente identificato nuove nanoparticelle con cui somministrare terapie geniche alle cellule endoteliali, che rivestono i vasi sanguigni, nonché a parecchi tipi di cellule immunitarie, che governano la risposta del nostro corpo alle malattie. È un risultato che potrebbe cambiare le terapie, consentendoci di alterare le attività delle proteine in cellule immunitarie che oggi sono refrattarie ai farmaci, nel senso che è difficile arrivare alle loro proteine con piccole molecole o anticorpi. Grazie ai dati che abbiamo pubblicato, fra l'altro, su riviste come «Proceedings of the National Academy of Sciences», «Advanced Materials» e «Journal of the American Chemical Society» nel 2018 e nel 2019, abbiamo destato grande attenzione tra gli altri gruppi che lavorano alle terapie geniche e abbiamo fondato GuideRx, un'azienda che utilizza codici a barre a DNA e si concentra sullo sviluppo di terapie geniche sicure.

La marcatura con codici a barre a DNA è ormai diventata tanto comune da essere applicata in diversi modi in uno stesso campo di ricerca. Un esempio è la biologia del cancro, che indaga le mutazioni genetiche provocano il cancro e come lo si può curare con nuovi farmaci. Qui la resistenza ai farmaci resta una delle principali sfide: spesso i pazienti inizialmente rispondono a un farmaco, ma poi subiscono ricadute quando esso perde la capacità di uccidere le cellule tumorali.

Nel laboratorio di Todd Golub alla Harvard University i ricercatori hanno usato i codici a barre a DNA per studiare queste resistenze. Nel 2016 hanno riferito di aver usato un virus per inserire in via permanente un codice a barre a DNA direttamente nel genoma di cellule cancerose. Le cellule tumorali di tipo A ricevevano come codice a barre a DNA la sequenza A, quelle di tipo B la sequenza B e così via. Gli scienziati hanno poi mischiato insieme le diverse cellule, coltivandole su piastra e trattandole con un farmaco anticancro.

Se il farmaco uccideva la cellula tumorale o ne rallentava la crescita, quella cellula non si divideva. Ma se diventava resistente al farmaco cominciava a dividersi rapidamente. Dunque nel tempo la quantità relativa della sequenza di codice a barre A aumentava se il tipo cellulare A diventava resistente al farmaco, o diminuiva se invece le cellule di tipo A erano uccise dal farmaco. Sequenziando nel tempo tutti i codici a barre delle cellule che sopravvivevano, il laboratorio ha potuto quantificare simultaneamente la bontà della risposta al farmaco di tutti i tipi cellulari.

Qualche tempo dopo, sempre nel 2016, il laboratorio di Monte Winslow alla Stanford University ha usato linee cellulari pancrea-

tiche marcate con codici a barre a DNA per trovare farmaci che fermino la diffusione metastatica del tumore. Nel laboratorio ogni linea cellulare riceveva il suo codice a barre attraverso un virus, e poi era collacata in un proprio pozzetto. Ogni pozzetto veniva poi trattato con un farmaco anticancro. In questo modo il farmaco «uno» era associato al codice a barre «uno». Subito dopo gli scienziati iniettavano le cellule nel flusso sanguigno e più tardi verificavano quanto le cellule si fossero diffuse nei polmoni. Vedendo quali codici a barre erano abbondanti o assenti, i ricercatori hanno identificato farmaci che promuovevano oppure prevenivano il processo di metastasi.

In un terzo esempio, alcuni scienziati del Broad Institute, presso il Massachusetts Institute of Technology e la Harvard University, hanno usato codici a barre a DNA per studiare come tutti i geni del genoma agiscono su uno stesso cancro. I ricercatori hanno cominciato facendo crescere un numero assai grande di cellule e coltivandole insieme in una piastra di grandi dimensioni. Poi hanno usato un sistema di modifica dei geni per inattivare o attivare tutti i geni del genoma, uno per uno. La sequenza del gene la cui espressione veniva modulata serviva da codice a barre. Trattando le cellule con un farmaco anticancro e sequenziando il DNA nel tempo, gli scienziati hanno potuto capire l'effetto di ciascuno dei geni del genoma sulla farmacoresistenza.

In questi approcci, il DNA è sia la molecola che produce i dati, visto che è necessaria per eseguire simultaneamente tutti gli esperimenti, sia quella che immagazzina i dati, visto che per analizzare i codici a barre a DNA si usa il sequenziamento di nuova generazione. Le implicazioni lasciano sbalorditi: le stesse tecniche possono essere applicate alle malattie autoimmuni e a quelle neurologiche, o alle disfunzioni cardiovascolari.

Servono ancora significativi progressi tecnologici prima che diventi normale immagazzinare dati nel DNA

Per capire quanto sia potente l'uso dei codici a barre a DNA, basta provare a sostituire, negli esempi sopra descritti, la parola «cancro» con il nome di un'altra malattia, o la parola «resistenza» con un altro tipo di risposta al farmaco. In questo modo la marcatura con codici a barre a DNA è sul punto di semplificare in modo fondamentale gli stadi iniziali dello sviluppo dei farmaci, accelerando lo sviluppo di nuove terapie.

Lettura e scrittura

La marcatura con codici a barre a DNA si basa sulla «lettura» di sequenze note di DNA. Fino a poco tempo fa, però, non era praticamente possibile «scrivere» sequenze di DNA. In parole povere, per me scrivere DNA significa convertire deliberatamente altre forme di informazione – come immagini, film o stati biologici – in sequenze che possono essere immagazzinate e lette in seguito. Molte di queste nuove tecnologie di scrittura sfruttano sistemi di modifica dei geni derivati dalle cosiddette «brevi ripetizioni palindrome raggruppate a spaziatura regolare» (CRISPR). Mediante sistemi CRISPR razionalmente ingegnerizzati, gli scienziati possono scrivere sequenze di DNA.

Molti dei più recenti progressi sfruttano il modo in cui i sistemi CRISPR si sono evoluti in natura nei batteri come difesa dagli attacchi virali. Nello specifico, un virus attacca un batterio legandosi alla sua superficie e poi inserendo in esso il proprio DNA o RNA. Per «ricordarsi» del virus in caso di futuri attacchi, nei batteri si sono evoluti i sistemi CRISPR, che identificano il DNA o RNA virale e poi ne inseriscono brevi frammenti nel proprio genoma. In altre parole, per difendersi i batteri «scrivono», o «registrano», la storia dei virus che li hanno attaccati.

Sfruttando questo meccanismo Seth Shipman, all'epoca nel laboratorio del genetista George Church a Harvard e ora all'Università della California a San Francisco, ha usato le sequenze CRISPR per registrare immagini di una mano umana direttamente nel genoma di *Escherichia Coli*.

Shipman e colleghi hanno prima fatto esprimere due proteine Cas1 e Cas2. Insieme, queste proteine sono in grado di acquisire sequenze nucleotidiche di DNA e inserirle nel genoma. Poi hanno «somministrato» a *E. coli* alcune sequenze in cui erano codificati i pixel che – una volta sequenziati insieme – davano luogo all'immagine di una mano. Per farlo gli scienziati hanno dovuto assegnare al DNA vari aspetti dell'informazione. Per esempio, in un caso A, C, G e T stavano ciascuno per un diverso colore dei pixel, mentre la posizione spaziale dei pixel nell'intera immagine era codificata in un'altra sequenza di codice a barre a DNA, associata alla prima.

Sequenziando il DNA estratto da *E. coli*, gli autori hanno poi ricostruito l'immagine originale con accuratezza superiore al 90 per cento. Successivamente hanno ripetuto l'esperimento, ma con un'importante modifica: hanno aggiunto il DNA in tempi diversi, e incluso un metodo con cui determinare la posizione delle sequenze di DNA registrate l'una rispetto all'altra. Individuando l'ordine in cui le sequenze erano state inserite, una dopo l'altra, nel genoma di *E. coli*, sono riusciti generare una serie di immagini, cioè a registrare in codice un filmato. I ricercatori hanno usato una versione in formato GIF di una parte del primo «film» della storia, realizzato da Eadweard Muybridge nel 1878, in cui era ripreso un cavallo al galoppo. In un lavoro del 2017 hanno mostrato di aver ricostruito il famoso filmato di Muybridge sequenziando il genoma del batterio.

Ancor più di recente, gli scienziati del laboratorio di Randall Platt al Politecnico federale svizzero di Zurigo (ETH) hanno fatto una scoperta decisiva, che porta ancora più avanti questi approcci prendendo di mira l'mRNA, una molecola chiave strettamente imparentata con il DNA. Invece di registrare immagini in codice in sequenze di DNA che non esistono in natura, hanno utilizzato un sistema CRISPR di una diversa specie batterica per generare «archivi viventi» dell'espressione in natura dei geni dei batteri in mRNA. L'insieme dei differenti mRNA presenti nella cellula determina quali proteine vengano sintetizzate, e di conseguenza tutte le funzioni cellulari.

Per registrare gli mRNA prodotti in una cellula in momenti diversi, gli scienziati del laboratorio di Platt hanno prima passato al vaglio le proteine CRISPR-Cas di numerosi ceppi batterici diversi. Hanno potuto così identificare proteine capaci di convertire l'mRNA naturale in DNA e inserirlo nel genoma; in particolare si tratta delle proteine Cas1 e Cas2 del batterio *Fusicatenibacter saccharivorans*. Attraverso una serie di eleganti studi con virus specializzati, nel 2018 il gruppo ha dimostrato che le cellule registravano accuratamente se in precedenza erano state esposte a stress ossidativi, a condizioni acide o persino a un erbicida. Sono risultati entusiasmanti, perché dimostrano che i geni espressi naturalmente da una cellula in un dato momento possono essere registrati nel genoma per analizzarli in seguito. Via via che il laboratorio

La struttura a doppia elica del DNA è ideale per immagazzinare informazioni, ma non può ancora sostituire i tradizionali dischi rigidi.

Getty Images

di Platt migliora la tecnologia, cresce la possibilità che queste registrazioni cellulari diventino routine; e ciò consentirebbe di ricostruire come una certa cellula è diventata tumorale, come risponde a un'infezione nel tempo e persino come invecchia.

Memorie a DNA sempre più diffuse

Man mano che il DNA è usato per generare, tracciare e immagazzinare informazioni in un numero crescente di campi, la domanda più ovvia è se il DNA finirà per competere con i convenzionali dispositivi di memoria elettronici nel conservare tutti i dati digitali generati dagli esseri umani. La risposta attualmente è no: dischi rigidi e memorie flash sono assai migliori, per tenerci le informazioni, dei sistemi a DNA, anche i più avanzati.

Come tutte le tecnologie, però, i dispositivi elettronici convenzionali hanno i loro limiti. Occupano spazio, fisicamente, e richiedono determinate condizioni ambientali; anche i più durevoli hanno poche probabilità di resistere più di qualche decennio. Viste le difficoltà, presto potrebbe diventare difficile conservare tutti i dati che stiamo generando oggi.

Il DNA, invece, potrebbe durare quasi certamente decine di migliaia di anni, se conservato correttamente. Già adesso viene normalmente conservato a –20 o anche a –80 gradi Celsius in laboratori che richiedono condizioni di freddo intenso, e lo si può conservare anche al caldo in condizioni estreme che i tipici dispositivi elettronici non possono sopportare. Nel 2015 Robert Grass e Wendelin Stark, entrambi all'ETH, hanno mostrato che il DNA conservato in silice può sopportare temperature di 70 gradi per una settimana senza che siano introdotti errori. E se in un disco rigido si può stipare anche un terabit per pollice quadrato, stime recenti suggeriscono che tutta l'informazione generata nel mondo intero potrebbe essere contenuta in meno di un chilogrammo di DNA.

Ci vogliono ancora significativi progressi tecnologici perché diventi normale immagazzinare informazioni nel DNA. Il limite principale è che immagazzinare l'informazione non è la stessa cosa che estrarla. Recuperare dati da un disco rigido è quasi istantaneo; per estrarli dal DNA bisogna sequenziarlo, il che oggi richiede da qualche minuto a una giornata. E malgrado gli enormi progressi degli ultimi anni i sequenziatori sono ancora molto più ingombranti e costosi dei dischi rigidi.

E non ci sono solo queste barriere da affrontare prima che l'immagazzinamento dei dati nel DNA possa sviluppare tutto il suo potenziale. Come società, dobbiamo anche riconoscere che la diffusione ubiquitaria del sequenziamento del DNA renderà ancora più facile tracciare le persone, e produrrà nuove vulnerabilità per la sicurezza dei dati. Abbondano gli esempi di preoccupazione per la privacy, negli Stati Uniti e a livello globale.

Il sequenziamento del DNA è già usato dai Dipartimenti di polizia un po' in tutti gli Stati Uniti, con ben pochi controlli. Chiedendo agli arrestati – anche per reati minori – di fornire il proprio DNA, la polizia sta costituendo vaste banche dati di informazioni genetiche. Qualcuno ha sostenuto che si tratta solo dell'equivalente delle vecchie impronte digitali per il XXI secolo, ma c'è una differenza cruciale. Le impronte digitali identificano un singolo individuo, ma se una persona concede il suo DNA rilascia informazioni con cui si possono identificare tutti i membri della sua famiglia. In Cina, sotto l'egida di un programma sanitario, i funzionari statali hanno raccolto informazioni genetiche su quasi 36 milioni di persone. Fra queste c'è un gran numero di Uiguri, membri di un gruppo etnico di religione mussulmana che subisce discriminazioni. Ed è ancora poco chiaro in che modo il governo userà questi dati.

Oggi queste preoccupazioni sui dati conservati nel DNA riguardano la costituzione genetica stessa delle persone; la discussione verte sulla protezione dell'identità. Ma in futuro, se altre categorie di informazioni, come quelle sanitarie, i contratti e le storie digitali degli individui, dovessero essere conservate in sequenze di DNA, si porranno molte altre domande sulla vulnerabilità di questa forma di memorizzazione in termini di sicurezza sia fisica sia cibernetica. Dato che si possono tenere tante informazioni in tanto poco spazio, come andranno distribuiti i dati per evitare che siano troppo concentrati in un unico posto? E anche se si arriverà a snellire la procedura di estrazione, quali saranno le routine per accedere ai dati e ripristinarli senza esporli ad attacchi di malintenzionati o a perdite accidentali?

Pensando al duro lavoro – scientifico, ma anche etico – ancora da compiere si rischia di scoraggiarsi. Ma a me piace pensare ai fratelli Wright perché sono cresciuto nella loro stessa cittadina, nell'Ohio. Il loro primo volo fu di 37 metri, e durò 12 secondi. Solo 66 anni più tardi, e senza neppure i moderni computer, gli esseri umani sono arrivati sulla Luna. Imprese come queste mi fanno guardare con ottimismo alla possibilità di arrivare nel giro di qualche decennio a sfruttare le naturali potenzialità del DNA; e, riconoscendo attivamente il rischio che produca danni, contribuire a rivolgerle prevalentemente a scopi positivi. ■

PER APPROFONDIRE

Next-Generation Digital Information Storage in DNA. Church G.M. e altri, in «Science», Vol. 337, p. 1628, 28 settembre 2012.

High-Throughput In Vivo Screen of Functional mRNA Delivery Identifies Nanoparticles for Endothelial Cell Gene Editing. Sago C.D. e altri, in «Proceedings of the National Academy of Sciences», Vol. 115, n. 42, pp. E9944-E9952, 16 ottobre 2018.

Transcriptional Recording by CRISPR Spacer Acquisition from RNA. Schmidt F. e altri, in «Nature», Vol. 562, pp. 380,385, 18 ottobre 2018.

Tech Turns to Biology as Data Storage Needs Explode. Patel P., ScientificAmerican.com, pubblicato on line il 31 maggio 2016.

IMMUNOLOGIA

Vaccini reinventati

Secondo una teoria controversa, un unico vaccino, somministrato in modo adeguato, potrebbe proteggere da varie malattie al di là del suo target

di Melinda Wenner Moyer

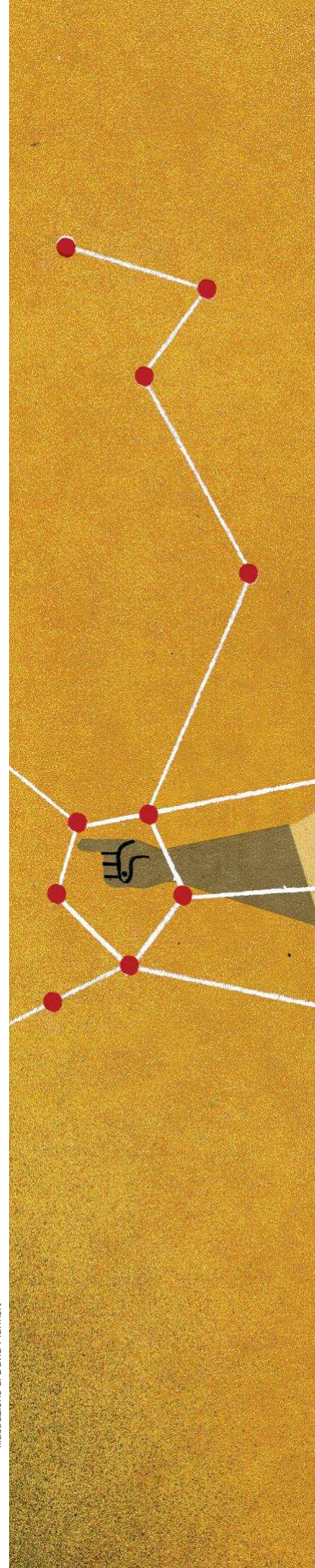
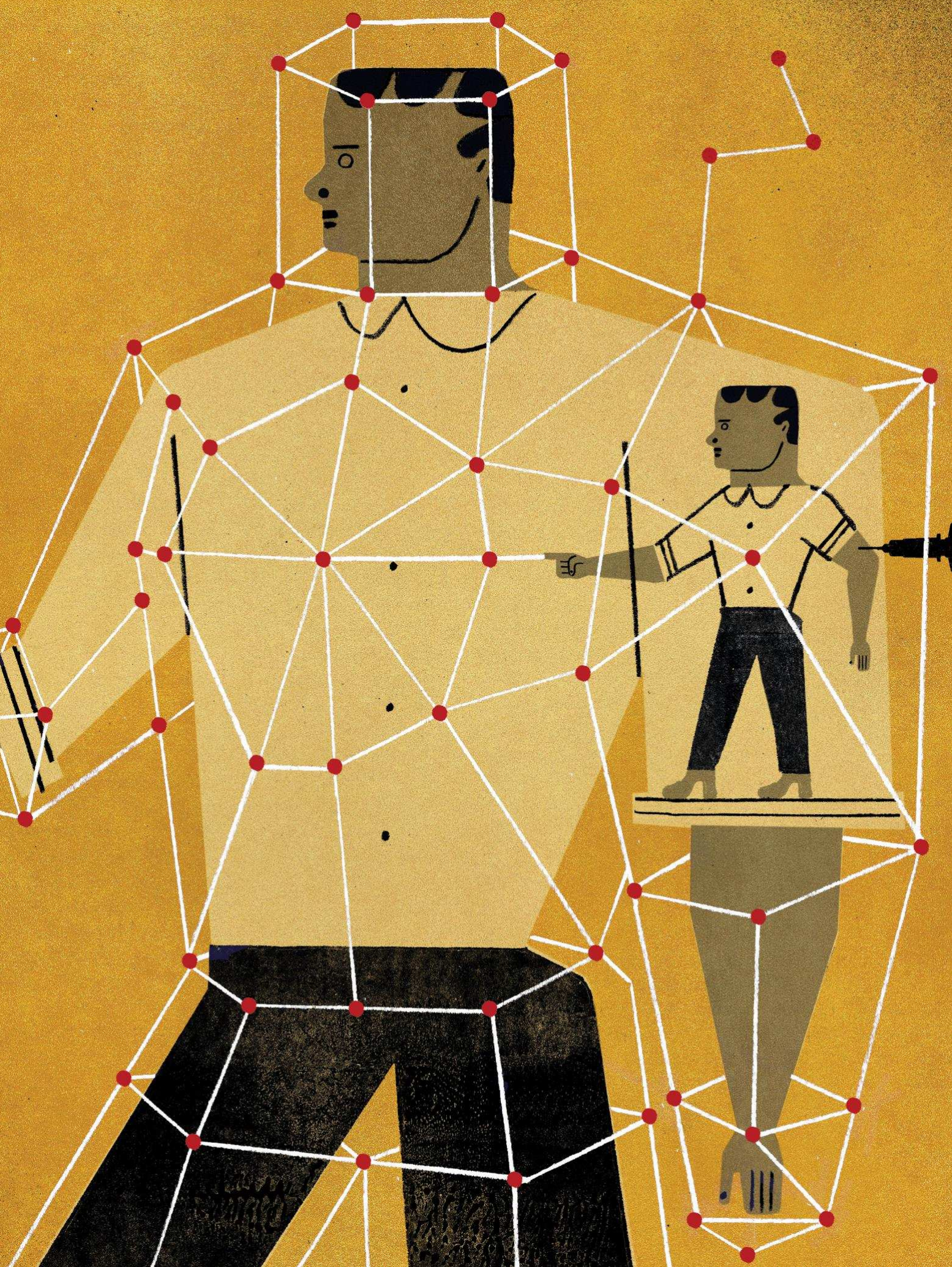
Era un pomeriggio della scorsa primavera. La calura del sole, una palla infuocata nel cielo dell'Africa occidentale, era mitigata da una brezza leggera. Di tanto in tanto un mango staccato dal vento cadeva con un tonfo sordo sul tetto di lamiera ondulata del centro medico di Bissau, la più grande città della Guinea-Bissau, una piccola nazione dalla terra color ruggine, dove non cadeva una goccia di pioggia da sei mesi. All'interno dell'edificio dall'aria stagnante e secca, una fila di donne e bambini madidi di sudore attendeva.

IN BREVE

I vaccini servono a combattere malattie specifiche, ma una serie di studi indica che alcuni offrono una protezione molto più ampia.

I vaccini vivi, in particolare, potrebbero consentire di ridurre i tassi di mortalità infantile complessivamente del 50 per cento, secondo i risultati di una serie di ricerche.

Questo lavoro, guidato da Peter Aaby e Christine Benn nella Guinea-Bissau, è stato però anche criticato per alcune conclusioni ritenute troppo azzardate.

Illustrazione di David Plunkert

Maria, una bambina di 18 mesi con grosse trecce scure, mi studiava nervosamente seduta in grembo alla madre (il nome della bambina è stato modificato per tutelarne la privacy). Accanto a loro, Carlito Balé, un medico in camice bianco dalla voce gentile, stava parlando con la madre di Maria in creolo portoghese, un mix ritmato di lingua portoghese e dialetti africani. Balé le stava spiegando che Maria era idonea a partecipare a una sperimentazione clinica per scoprire se una dose extra di vaccino contro il morbillo avrebbe potuto prevenire non solo il morbillo, ma anche molte infezioni pediatriche gravi e potenzialmente letali.

Melinda Wenner Moyer è collaboratrice editoriale di «Scientific American», per cui ha scritto, tra gli altri, l'articolo *Un'epidemia americana* (in «Le Scienze», n.599, luglio 2018), vincitore del secondo premio della categoria politiche sanitarie dell'Awards for Excellence in Health Care Journalism.

Negli Stati Uniti, dove queste infezioni avvengono di rado, una sperimentazione simile riuscirebbe a reclutare pochi volontari. Ma in Guinea-Bissau, dove la gente è provata da decenni di risorse scarse e assistenza sanitaria insufficiente, le famiglie sono accorse in gran numero. La Guinea-Bissau è una delle nazioni più povere al mondo e, secondo i dati della CIA, è la quarta su 225 in termini di mortalità infantile. Non è raro che le madri aspettino mesi prima di dare un nome ai neonati perché un bambino su 12 muore entro l'anno d'età.

I ricercatori a capo della sperimentazione, l'antropologo Peter Aaby e la dottoressa Christine Benn, che ho incontrato durante il mio viaggio in Guinea-Bissau, hanno raccolto diverse prove che dimostrano che alcuni vaccini specifici sono in grado di neutralizzare diverse malattie gravi. Hanno pubblicato centinaia di studi che sostengono che i vaccini vivi attenuati, realizzati a partire da virus o batteri vivi ma indeboliti, possono prevenire non solo le infezioni target ma anche altre patologie, tra cui infezioni respiratorie (come la polmonite), ematiche (sepsi) e diarroiche. In una revisione del 2016 pubblicata sul «British Medical Journal», un team di ricerca incaricato dall'Organizzazione mondiale della Sanità ha analizzato 68 articoli, molti dei quali derivati dall'attività di ricerca di Aaby e Benn. Dall'analisi è emerso che i vaccini contro il morbillo e la tubercolosi «riducono la mortalità complessiva più di quanto ci si aspetterebbe dalla semplice azione preventiva delle suddette malattie». Alcune delle ricerche esaminate dal team collegavano il vaccino anti morbillo a una riduzione addirittura del 50 per cento del rischio di morte per qualsiasi causa.

Nuove ricerche indicano che i vaccini vivi stimolano una parte del sistema immunitario che combatte tutti gli invasori

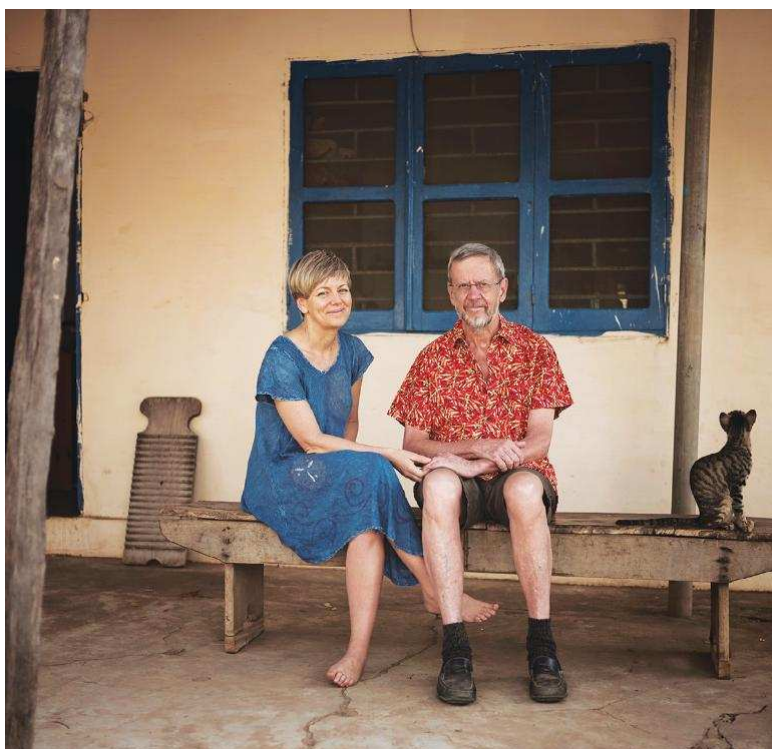
L'ipotesi che i vaccini vivi abbiano effetti *off-target*, e per di più potenti, ha implicazioni che vanno ben oltre l'Africa. Nel 2017 negli Stati Uniti, per esempio, ricercatori del Centers for Disease Control and Prevention hanno riscontrato che le probabilità di ricovero di bambini di età tra 16 e 24 mesi per infezioni non target del vaccino diminuivano del 50 per cento se l'ultimo vaccino ricevuto dal bambino era vivo anziché inattivato. Nuove ricerche di immunologia indicano che i vaccini vivi possono avere effetti di ampia portata, stimolando una parte del sistema immunitario che contrasta tutti gli invasori esterni. «Benché rimangano molti dettagli da chiarire, non ho più alcun dubbio sul fatto che i vaccini abbiano effetti off-target, grazie alla varietà di prove raccolte», afferma Frank Shann, del Royal Children's Hospital di Melbourne.

Altri scienziati, tuttavia, non sono altrettanto convinti, e il lavoro di Aaby e Benn ha dato origine a numerosi dibattiti. In primo luogo, la maggior parte degli studi dei due ricercatori danesi non prova connessioni causa-effetto, ma illustrerebbe soltanto alcuni «effetti presunti», secondo la descrizione formulata da Paul Fine, un epidemiologo delle malattie infettive della London School of Hygiene & Tropical Medicine. È possibile che i bambini che ricevono vaccini vivi sopravvivano più a lungo per motivi che non hanno nulla a che vedere con le vaccinazioni: i bambini di quei gruppi, per esempio, potrebbero essere stati più sani già in partenza. Per rispondere a simili interrogativi, Aaby e Benn stanno conducendo alcuni studi osservazionali, come quello proposto a Maria. In pratica, i bambini saranno abbinati ai trial in base all'età e alle condizioni di salute di base; alcuni riceveranno il vaccino antimorbillo standard all'età di nove mesi, mentre altri riceveranno una dose aggiuntiva negli anni successivi.

I due ricercatori controbattono che le loro idee suscitano resistenza più per ragioni politiche e pratiche che per valide motivazioni scientifiche. Aaby sostiene che le ricerche del team sarebbero scomode per motivi di ordine pubblico, perché indicano che i vaccini vivi vanno somministrati come ultimi di ogni serie di vaccinazioni, e questo capovolgerebbe gli attuali schemi vaccinali e potrebbe alimentare involontariamente le preoccupazioni dei genitori sulla sicurezza. Gli esperti di salute pubblica «non vogliono saperne, e capisco le loro motivazioni», afferma Aaby. Di conseguenza, molti ricercatori del settore «mi hanno etichettato come persona non gradita». In effetti, Aaby è perfetto nel ruolo dello scienziato eccentrico, ostinato e incompreso, tanto da aver ispirato il personaggio di un giallo che viene assassinato nel primo capitolo.

Nella vita reale, per le idee di Aaby e Benn probabilmente è arrivato il punto di svolta. In un rapporto del 2014 l'OMS ha riconosciuto che il fatto che un vaccino possa avere effetti aspecifici è «plausibile e comune», e degno di maggiore attenzione. Pertanto, ad aprile 2017 l'agenzia ha annunciato che sovraintenderà la progettazione di due trial clinici pluriennali per verificare ulteriormente l'ipotesi, che però non sono ancora iniziati. I due ricercatori, il cui rapporto professionale si è trasformato da tempo in una relazione sentimentale, stanno conducendo anche altri studi, compreso quello proposto alla madre di Maria. Proprio mentre mi trovato al centro medico, la signora ha deciso di far partecipare la figlia al trial. Il dottor Balé ha quindi preso una grossa busta contenente decine di buste più piccole sigillate e le ha chiesto di sceglierne una, per assicurare la massima casualità nell'assegnazione della bambina al gruppo terapeutico o al gruppo di controllo. Dopo aver aperto la busta prescelta, Balé ha annunciato che Maria avrebbe ricevuto il vaccino aggiuntivo, e la madre ha sorriso piena di speranza.

Indizio: morbillo

Nel 1979, poco dopo aver avviato un progetto di monitoraggio sanitario a Bissau, il giovane Aaby scoprì che nella zona il morbillo uccideva un neonato. Fu l'anno in cui vide il suo primo cadavere, cui ne seguirono molti altri. All'epoca i vaccini pediatrici in

Christine Benn e Peter Aaby davanti alla loro casa in Guinea-Bissau, dove conducono gran parte delle loro ricerche sui vaccini.

Sofia Busk Hansen

Africa erano rari. Secondo le stime dell'OMS, nel 1980 solo il 6 per cento dei bambini africani aveva ricevuto la prima dose di vaccino antimorbillo vivo, mentre solo l'8 per cento aveva ricevuto il primo vaccino DTP inattivato contro difterite, tetano e pertosse. E non si trattava di una novità assoluta: il vaccino di associazione DTP era stato infatti approvato nel 1949, ma 31 anni dopo meno di un bambino africano su 12 ne aveva ricevuta una dose. In realtà, in Africa era disponibile solamente una manciata di vaccini pediatrici. Oltre ai vaccini anti-DTP e antimorbillo, erano disponibili un vaccino antitubercolare vivo detto bacillo di Calmette-Guérin (BCG) e un vaccino antipoliomielite vivo. Nel 1980 negli Stati Uniti, invece, l'86 per cento dei bambini aveva ricevuto il vaccino antimorbillo vivo, al 98 per cento era stato inoculato il vaccino DTP inattivato mentre il 95 per cento aveva ricevuto le vaccinazioni antipolio. Attualmente i bambini africani ricevono molti più vaccini di un tempo, ma la situazione resta terribilmente arretrata.

Nel 1978, un anno prima che scoppiasse una storica epidemia di morbillo, Aaby era stato inviato in Guinea-Bissau da un'organizzazione svedese per fare ricerche sulla denutrizione. Quando l'epidemia colpì la città, Aaby fece di tutto per importare vaccini antimorbillo, che cominciò a inoculare ai bambini del posto senza mai perdere d'occhio i tassi d'infezione e di decesso. Fu una mossa coraggiosa: all'epoca, infatti, le autorità sanitarie pubbliche ritenevano che le campagne di vaccinazione antimorbillo in Africa fossero essenzialmente uno spreco di denaro e risorse. In un articolo del 1981 pubblicato su «Lancet», alcuni ricercatori presentarono un'analisi dei dati di sopravvivenza dopo una campagna di vaccinazione antimorbillo in Zaire, giungendo alla conclusione che in futuro «sarebbe stato utile pensarci due volte prima di assegnare le già esigue risorse a un programma del genere». Essi obiettavano che il morbillo uccideva i bambini più deboli, quindi anche se il vaccino fosse riuscito a prevenire quell'infezione i bambini risparmiati sarebbero comunque morti presto per altre cause.

L'esperienza di Aaby non collimava affatto con questa argomentazione. I numeri precedenti e successivi alla vaccinazione da lui osservati erano sbalorditivi: nel 1979, il primo anno dell'epidemia, i decessi avevano interessato il 13 per cento dei bambini di età compresa tra sei mesi e tre anni. Nel 1980, quando fu disponibile il vaccino antimorbillo, la percentuale si era ridotta al 5 per cento. Il fatto sorprendente era che tra il 1979 e il 1980 anche i decessi dovuti a cause diverse dal morbillo diminuirono di un quinto, e quella tendenza continuò. Anche dopo la scomparsa del morbillo, i bambini vaccinati continuavano ad avere più probabilità dei coetanei di sopravvivere ad altre infezioni. «Fu uno di quei momenti in cui, di colpo, ci si rende conto che qualcosa che non si sarebbe mai ritenuto possibile è invece reale», ricorda.

Aaby e i suoi colleghi scrissero una lettera a «Lancet» confutando la teoria che sosteneva che le campagne di vaccinazione antimorbillo in Africa fossero inutili: fu la sua primissima pubblicazione in una rivista medica. Dopo quegli eventi, ricorda, il vaccino antimorbillo «diventò una vera ossessione». Attualmente ha pubblicato oltre 100 studi su questo vaccino. Il Bandim Health Project, il programma di monitoraggio da lui avviato come collaborazione tra il Ministero della Sanità della Guinea-Bissau e lo State Serum Institute danese, è una delle ragioni. Da oltre quarant'anni il progetto registra tutte le gravidanze, le nascite e i decessi del distretto urbano di Bandim e di altre cinque aree rurali adiacenti. Il team di Aaby ha monitorato la salute di oltre 500.000 residenti in quelle zone, raccogliendo dati su ricoveri ospedalieri, vaccinazioni e scelte di natura sanitaria, come l'uso di zanzariere per dormire.

I suoi colleghi e assistenti del progetto lo chiamano affettuosamente «Homem Grande», ovvero l'uomo grande nella lingua locale. Aaby è sempre stato una sorta di lupo solitario, e trascorre molte giornate a lavorare da solo nel suo ufficio di casa, anche se negli ultimi 15 anni le cose sono un po' cambiate. Mentre Benn frequentava la Facoltà di medicina dell'Università di Aarhus, in Danimarca, nel 1992, le fu consigliato di contattare Aaby perché voleva studiare se gli integratori di vitamina A, somministrati di routine assieme al vaccino antimorbillo nei paesi in via di sviluppo, avessero qualche interazione con il vaccino. «Ho ancora il foglietto di carta con il suo numero», mi racconta Benn. La sua collaborazione con Aaby, iniziata allora, prosegue tutt'oggi. Oggi Benn insegna salute globale presso l'Università della Danimarca meridionale e dirige il braccio danese del Bandim Health Project. La sua attività è molto prolifica, con oltre 200 articoli pubblicati su tematiche quali gli effetti aspecifici dei vaccini e l'impatto degli integratori di vitamina A sui lattanti nei paesi in via di sviluppo. La sua casa è la Danimarca, ma Benn passa una decina di settimane all'anno in Guinea-Bissau. I due ricercatori portano sul campo, e nella loro relazione, le loro due personalità complementari: Benn è effervescente e filosofica, mentre Aaby è serio e puntiglioso.

In larga misura, il lavoro di Aaby e Benn sul vaccino antimorbillo ha dato sostegno alle osservazioni iniziali di Aaby. In un importantissimo articolo pubblicato nel 1995 sul «BMJ», i due analizzarono i

dati di 12 studi pubblicati in precedenza (alcuni dei quali condotti da loro stessi) sull'associazione tra vaccino antimorbillo e mortalità nei paesi in via di sviluppo: ne emerse che il vaccino era legato a una diminuzione tra il 30 e l'86 per cento del rischio complessivo di morte. In ciascuno studio, il morbillo aveva ucciso solo una piccola percentuale di bambini senza copertura vaccinale. Ciò significava che non preveniva solamente il morbillo, ma che doveva sortire anche altri effetti. In un articolo del 2014 sul «Journal of the American Medical Association», Aaby e Benn hanno collaborato con alcuni ricercatori danesi per cercare di capire se gli effetti protettivi si estendevano anche ai paesi ad alto reddito. E hanno scoperto che i bambini danesi che ricevevano il vaccino vivo contro morbillo-parotite-rosolia (MPR) come ultima iniezione avevano il 14 per cento di probabilità in meno di essere ricoverati per qualsiasi infezione rispetto ai bambini che avevano ricevuto come dose più recente il vaccino inattivato DTaP-IPV-Hib contro difterite, tetano, pertosse acellulare, polio ed *Hemophilus influenzae* di tipo B. Quello studio ha ispirato l'analisi del 2017 dai CDC da cui è risultato che i vaccini vivi erano associati a una protezione addirittura maggiore negli Stati Uniti.

Aaby e Benn, inoltre, hanno correlato il vaccino anti-BCG a un'inferiore mortalità neonatale, e hanno studiato anche il vaccino antipolio orale (OPV) vivo. In un articolo del 2018 hanno riferito che i tassi di mortalità infantile erano diminuiti del 19 per cento dopo le campagne OPV, e da una sperimentazione clinica pubblicata nel 2015 è emerso che la somministrazione dell'OPV in associazione al BCG entro due giorni dalla nascita riduceva il rischio di mortalità del 42 per cento rispetto al BCG da solo. Nel 2016, basandosi in parte sulle loro scoperte, 15 scienziati hanno inviato una lettera a «Lancet» in cui sostenevano che il passaggio a livello globale dall'OPV vivo all'IPV, il vaccino antipolio inattivato (che rientra nel piano dell'iniziativa mondiale di eradicazione della polio) potrebbe inavvertitamente aumentare la mortalità infantile.

L'idea che un vaccino antitubercolare modificasse la risposta ad altri patogeni contraddiceva paradigmi consolidati

I due scienziati sono certi che le prove che hanno accumulato puntano a una chiara conclusione: i vaccini influiscono sull'organismo molto più di quanto pensassimo. Il grande mistero che resta da risolvere è quali siano esattamente i meccanismi coinvolti.

Un richiamo ad ampio spettro

Mihai G. Netea potrebbe avere una risposta. Nel 2010 Netea, immunologo all'Università di Radboud, nei Paesi Bassi, avviò uno studio senza essere troppo convinto del suo interesse. Il suo laboratorio stava studiando gli effetti del vaccino anti-BCG sulle cellule immunitarie umane, e più precisamente su come le aiutava a riconoscere e attaccare il batterio *Mycobacterium tuberculosis*. Come controllo sperimentale di un test, il personale del laboratorio espose a *Candida albicans,* un lievito comune, alcuni campioni ematici di volontari vaccinati. Secondo la dottrina immunologica accettata, che sostiene che i vaccini sollecitano una risposta immunitaria specifica al patogeno target, il vaccino anti-BCG non avrebbe avere alcun effetto sulla risposta ematica a *Candida*.

Qualche settimana dopo la studentessa incaricata di eseguire il test andò da Netea piuttosto preoccupata: «Penso di aver sbagliato qualcosa perché ho notato delle differenze sia con la tubercolosi sia con *Candida*». Forse i campioni erano stati contaminati. Netea le consigliò di prelevare altri campioni ematici e di rifare l'esperimento, cosa che fece, ottenendo però lo stesso risultato. «Tornò da me e mi disse: "Non so proprio che fare, ma è successa di nuovo la stessa cosa"», racconta Netea. Che, sconcertato, cominciò a cercare maggiori informazioni sul BCG, trovando una serie di sorprendenti studi sugli animali secondo cui il vaccino ne aveva protetto alcuni anche da malaria, influenza e *Listeria monocytogenes,* una causa comune di intossicazione alimentare.

Fu in quel momento che il semplice studio di Netea si trasformò in una mitologica sirena, una creatura che implorava tutta la sua attenzione. Com'era possibile che un vaccino antitubercolare modificasse la risposta dell'organismo ad altri patogeni? L'idea era in contraddizione con i paradigmi consolidati. Le vaccinazioni stimolano l'organismo a produrre proteine, gli anticorpi, in grado di riconoscere, legarsi e attaccare le proteine presenti sui patogeni qualora l'organismo li incontri nuovamente. Questa difesa è nota come immunità adattativa e agisce come una squadra di tiratori che mirano solo a bersagli ben precisi.

Data la specificità dell'immunità adattativa, per Netea non aveva alcun senso che fosse collegata alla capacità del BCG di proteggere contro una serie di patologie. Un altro tipo di difesa dell'organismo, tradizionalmente ritenuta estranea ai vaccini, è noto come immunità innata, e la si potrebbe paragonare a un battaglione pronto ad aprire il fuoco su chiunque capiti a tiro. Si tratta di una squadra a risposta rapida che combatte qualsiasi nuovo invasore. In caso di invasione da parte di un agente patogeno, le cellule infiammatorie innate vengono richiamate sul sito di infezione. Grossi globuli bianchi detti fagociti, e in particolare un tipo noto come macrofagi, inglobano e distruggono gli agenti patogeni. Essi, inoltre, secernono sostanze immunitarie chiamate citochine, che richiamano altre cellule immunitarie sul sito interessato. La reazione produce proteine che etichettano, per così dire, gli agenti patogeni, in modo che i fagociti possano trovarli più facilmente.

Poiché il BCG potenziava la protezione contro svariati agenti patogeni, Netea ne dedusse che potesse essere coinvolto il sistema immunitario innato. Secondo l'opinione comune, però, il sistema immunitario innato non era in grado di «ricordare» incontri immunologici pregressi, avvenuti per esempio mediante la stimolazione da parte di vaccini ricevuti in passato. L'idea, sostenuta da tempo, era che le cellule immunitarie innate attaccassero qualunque potenziale nemico dimenticando tutto a battaglia avvenuta, un po' come un soldato che soffre di amnesia. Ma l'idea si è rivelata del tutto errata.

In un articolo pubblicato nel 2012 sui «Proceedings of the National Academy of Sciences», il team di Netea affermava che, quando poi sono esposte ad altri patogeni, le cellule immunitarie umane attivate dal BCG producono il quadruplo di una citochina fondamentale, l'IFN-gamma (IFN-γ), e il doppio delle citochine TNF e interleuchina-1 beta (IL-1ß). Le cellule riescono ad attivare simili risposte potenziate addirittura per tre mesi dopo la vaccinazione. Ciò significa che, dopo tutto, il sistema immunitario riesce a ricordare quanto ha appreso. Più di recente, nel 2018, i ricercatori hanno riferito che il BCG riprogrammerebbe le cellule immunitarie umane in modo da aiutarle a prevenire il virus della febbre gialla.

Netea «è stato un pioniere di un nuovo settore dell'immunologia innata», afferma Helen Goodridge, immunologa del Cedars-Sinai Medical Center di Los Angeles. Altri studi eseguiti presso al-

Doppie difese

Il sistema immunitario è suddiviso in due bracci: adattativo e innato. Il braccio adattativo crea cellule che reagiscono solo a batteri o altre minacce specifiche. Il braccio innato ha invece una risposta più rapida, ma la sua efficacia contro un germe specifico è più limitata. Secondo una nuova teoria, questo braccio può essere «istruito» da vaccini con agenti patogeni vivi ma attenuati a essere più potente contro una serie di germi.

Prima infezione

Seconda infezione

Immunità adattativa

Questa parte del sistema immunitario cattura per prime le componenti di un agente patogeno dette antigeni. Le cellule presentano gli antigeni (spesso proteine derivanti da batteri o virus) ai linfociti *T*, trasformandoli da «*naive*» ad «attivati». Le cellule usano gli antigeni per avviare una reazione immunitaria specifica contro l'invasore. La risposta prevede l'azione di cellule killer che attaccano le cellule infettate, l'azione di messaggeri chimici detti citochine che attivano altre risposte distruttive, oltre alla creazione di cellule della memoria che permangono nell'organismo e sono in grado di riconoscere il patogeno qualora si ripresentasse. In caso di una reinfezione, in pratica, le cellule della memoria consentono al sistema immunitario di identificare il patogeno e attaccarlo.

Patogeno A
Cellula ospite
La cellula ospite infettata dal patogeno viene distrutta
Cellula dendritica con antigeni
Linfocita T killer
Antigene (frammento del patogeno A)
Linfociti T attivati
Linfocita T naive
Citochine (proteine di segnale)
Linfociti T di memoria

Patogeno A
I linfociti T di memoria promuovono una risposta più efficiente dei linfocita T killer
Linfocita T killer
Primed T cells
Linfociti T di memoria
Linfociti T di memoria

Immunità innata

Questo braccio si serve di globuli bianchi, detti macrofagi, che inglobano qualsiasi agente patogeno senza avere target specifici. Ricerche recenti rivelano però che anche le componenti innate sono in grado di ricordare un incontro pregresso con un patogeno. Questi incontri possono essere avvenuti a causa di un patogeno attenuato in un vaccino vivo e contrassegnano i macrofagi in maniera epigenetica: la configurazione del loro DNA viene alterata e trasmessa alle cellule figlie. Queste variazioni promuovono la risposta immunitaria contro più agenti patogeni e alterano il metabolismo dei macrofagi per potenziarne l'attività di difesa. Se l'organismo subisce un attacco da un patogeno diverso, le cellule producono altre citochine che scatenano una reazione infiammatoria e altri processi nocivi per gli invasori.

Patogeno A (o vaccino con patogeno vivo attenuato)
Il patogeno viene ingerito e distrutto
Modifica epigenetica dei pathway immunologici e metabolici
Macrofago naive
Citochine

Patogeno B
Un'elevata produzione di citochine da parte del macrofago istruito promuove l'infiammazione e attiva altre cellule immunitarie
Macrofago istruito

Illustrazione di Jen Christiansen; Fonti: "Trained immunity: A program of innate immune memory in health and disease," di Mihai G. Netea et al., in Science, Vol. 352; April 22, 2016, and "Innate immune memory: a paradigm shift in understanding host defense," di Mihai G. Netea et al., in Nature Immunology, Vol. 16; July 2015

tri laboratori sostengono la sua teoria, dimostrando che il vaccino antimorbillo potenzia la risposta immunitaria dell'organismo nei confronti della tossina prodotta dai batteri del tetano, come anche la risposta in caso di esposizione alla *Candida*.

Le modalità con cui il vaccino antimorbillo provoca effetti così ampi non sono chiare, ma il lavoro di Netea indica che il BCG addestra il sistema immunitario innato dando l'avvio a modifiche del metabolismo cellulare e decidendo le modalità di controllo di geni immunitari chiave. Una volta ricevuto il BCG, i geni immuno-correlati importanti vengono contrassegnati da piccoli «timbri» molecolari che, in seguito, riusciranno a identificare i geni in modo da poterli attivare rapidamente in caso di invasione di un altro patogeno.

Ma perché un vaccino vivo sarebbe in grado di scatenare questi effetti meglio di un vaccino inattivato? I ricercatori hanno ipotizzato che gli organismi vivi inducano una reazione diversa semplicemente perché sono vivi e non semplici pezzetti di un organismo, come nel caso dei vaccini inattivati (a quanto pare, le infezioni reali in piena regola, come il morbillo, non hanno effetti altrettanto vantaggiosi e possono, al contrario, sopprimere il sistema immunitario).

Mentre scriveva le conclusioni del suo studio del 2012 su «PNAS», Netea si imbatté in una sperimentazione appena pubblicata da Aaby e Benn secondo cui il BCG riduce la mortalità neonatale complessiva, una conclusione che venne criticata come

biologicamente impossibile. Elettrizzato, scrisse ad Aaby, informandolo che aveva appena scoperto un meccanismo che combaciava con i suoi risultati. Da allora i due ricercatori e Benn hanno avviato una collaborazione per decifrare l'immunologia che si cela dietro i dati della Guinea-Bissau. A quanto pare, i vaccini «modificano il sistema immunitario e non si limitano a farlo solamente in modo adattativo, patogeno-specifico», afferma Tobias Kollmann, immunologo e infettivologo della University of British Columbia e che di tanto in tanto collabora con Aaby, Benn e Netea. «Lo modificano in tutta una serie di modi diversi».

Sperimentazioni sotto accusa

Neal Halsey concorda che Aaby abbia dato contributi fondamentali alla ricerca sui vaccini nel corso della sua carriera, ma ritiene che il suo lavoro sugli effetti off-target non sia uno di essi. Halsey, ex direttore dell'Institute for Vaccine Safety della Johns Hopkins University, conosce lo scienziato danese da molti anni. Ricorda che, negli anni ottanta, Aaby fu il primo a identificare un potenziale problema di sicurezza di un nuovo vaccino antimorbillo più concentrato introdotto in Guinea-Bissau e altri paesi in via di sviluppo. In principio nessuno gli credette (evento ricorrente nella vita di Aaby), ma poi Halsey esaminò i dati che aveva raccolto ad Haiti e osservò gli stessi effetti. Basandosi principalmente sui loro risultati, nel 1992 l'OMS ritirò il vaccino dal mercato.

Oggi, però, Halsey ritiene che Aaby stia mettendo le proprie convinzioni davanti alla scienza. In occasione del Congresso mondiale sui vaccini tenutosi nel 2018 a Washington, Halsey ha affermato che, nonostante non dubiti che i dati sulla Guinea-Bissau siano reali, Aaby e Benn ne hanno tratto conclusioni causali inopportune. I bambini vaccinati nei tempi previsti sono spesso molto diversi dai loro coetanei non vaccinati altrettanto puntualmente: per esempio potrebbero essere più sani in partenza, o avere genitori più benestanti che hanno i mezzi per portarli dal medico e prendersi meglio cura di loro in generale. Secondo Halsey, concludere che ai vaccini sia attribuibile uno spettro di esiti medici estremamente diversificati è davvero eccessivo.

Aaby e Benn sono convinti che gli effetti del vaccino siano reali, anche se non sono ancora completamente compresi

Uno studio olandese pubblicato nel 2017 sul «BMJ» conferma questa tesi. I ricercatori hanno analizzato i tassi di ospedalizzazione dei bambini che avevano ricevuto un vaccino vivo tra le ultime inoculazioni, confrontandoli con i tassi di ospedalizzazione dei bambini che, più di recente, avevano ricevuto solo vaccini inattivati. Hanno così appurato che i bambini del primo gruppo avevano il 38 per cento di probabilità in meno degli altri di essere ricoverati per infezioni, ma anche il 16 per cento di probabilità in meno di essere ricoverati per traumi o intossicazioni. I vaccini non dovrebbero influire sul rischio di incidenti; il fatto che i ricercatori abbiano rilevato questa correlazione rafforza l'ipotesi che l'anamnesi vaccinale sia strettamente correlata ad altri fattori. Gli autori, tuttavia, riconoscono che è molto probabile che la modalità di somministrazione dei vaccini nei Paesi Bassi (dove le vaccinazioni sono preprogrammate e in genere i genitori annullano gli appuntamenti solo se i bambini sono ammalati) possa potenziare il cosiddetto effetto «vaccinato sano», e che gli esiti provenienti da altri paesi non siano altrettanto distorti.

Dato che è così complicato interpretare la causalità a partire da studi osservazionali, Halsey e altri colleghi hanno chiesto ad Aaby e Benn di condurre altre sperimentazioni controllate randomizzate, che sono lo standard aureo per decifrare gli effetti di un intervento. In questi studi i bambini vengono selezionati in modo casuale per ricevere vaccini oppure un placebo e successivamente monitorati. L'assegnazione casuale elimina la possibilità che lo stato socioeconomico o di salute generale possa influire sulle decisioni vaccinali. Il problema è che i vaccini sono già una politica pubblica raccomandata a livello globale, pertanto sarebbe eticamente scorretto negare le vaccinazioni ad alcuni bambini per poterli studiare. Gli scienziati, perciò, devono fare ricorso alla creatività, progettando sperimentazioni che prevedano la somministrazione di vaccini aggiuntivi o precoci ai bambini, oppure avvalendosi dei ritardi naturali nella ricezione dei vaccini.

Avviare una sperimentazione clinica in Guinea-Bissau è particolarmente problematico. Aaby e Benn devono conservare i vaccini in un frigorifero a casa, dotato di un generatore, perché la rete elettrica è imprevedibile. Un altro problema è l'instabilità politica: nel 1998 una delle sperimentazioni fu interrotta da una devastante guerra civile. Alcuni residenti di Bissau parlano solo dialetti rari, il che complica ulteriormente le cose, e molti non hanno il telefono.

Malgrado queste difficoltà, Aaby e Benn stanno cercando di condurre sperimentazioni randomizzate come quella a cui partecipa Maria. In alcuni casi i risultati dei test non hanno dato conferma ai risultati ottenuti in precedenza. In una sperimentazione del 2018, per esempio, i ricercatori hanno scoperto che i lattanti che avevano ricevuto il vaccino antimorbillo raccomandato all'età di nove mesi, oltre a una dose antimorbillo aggiuntiva tra quattro mesi e quattro mesi e mezzo, non evidenziavano minori probabilità di ricovero o decesso dei lattanti che non avevano ricevuto dosi extra. I due, tuttavia, sono convinti che gli effetti del vaccino siano reali, anche se non completamente compresi. Halsey, dal canto suo, ritiene che la loro ostinata tenacia sia preoccupante. «Uno scienziato obiettivo molto bravo deve saper riconoscere quando una sua osservazione iniziale si dimostra non vera», dice.

Aaby e Benn sono impopolari anche per un altro motivo: hanno pubblicato studi in cui suggeriscono che i vaccini inattivati, come il DTP, hanno effetti nocivi soprattutto per le bambine. Nonostante questi vaccini proteggano dalle malattie target, Aaby e Benn li hanno correlati a un aumento del rischio di altre malattie infettive. Il motivo non è chiaro: forse l'esposizione a patogeni morti renderebbe il sistema immunitario più tollerante nei confronti di altri intrusi futuri? I critici sostengono che simili associazioni sono non solo pretestuose, ma anche pericolose, perché potrebbero minare ulteriormente la fiducia della gente nei vaccini. «Alcuni dei miei colleghi mi considerano solo un pazzo che crea problemi», ammette Aaby.

Alla ricerca di chiarezza

Le sue battaglie, però, stanno entrando in una nuova fase. Aaby sa che i suoi fondi di ricerca sono agli sgoccioli, ma l'OMS dice che interverrà. Lo scienziato ha contattato l'agenzia una prima volta nel 1997 per comunicare le sue scoperte. Nel 2013 è stato istituito un gruppo di lavoro per esaminare i dati. Nel 2014 l'OMS ha riconosciuto che la questione meritava ulteriore attenzione, e

Un neonato riceve il vaccino antitubercolare in un ospedale della Guinea-Bissau. Secondo alcuni studi, il vaccino proteggerebbe da molte malattie.

Melinda Wenner Moyer

nel 2016 e 2017 ha parlato della possibilità di sovrintendere sperimentazioni aggiuntive. Una di esse mira a ricercare gli effetti sulla mortalità infantile della somministrazione alla nascita del vaccino BCG rispetto a placebo. L'altra valuterà invece gli effetti di una dose aggiuntiva di vaccino antimorbillo somministrata in associazione a DTP a un'età compresa tra 12 e 16 mesi.

Aaby e altri temono però che queste sperimentazioni non faranno molta chiarezza. I partecipanti riceveranno i vaccini inattivati in concomitanza con i vaccini vivi o in seguito. Questo, stando alle precedenti conclusioni di Aaby, potrebbe annullare gli effetti potenzialmente benefici. «Ne abbiamo discusso approfonditamente con numerosi esperti, ed è chiaro che quelle sperimentazioni non daranno la risposta auspicata», dice Kollmann. Shann, il pediatra australiano, concorda. Quelle sperimentazioni saranno «uno scandaloso spreco di tempo e risorse», afferma, perché «nessuno dei soggetti coinvolti è davvero un esperto del settore».

E, per ora, non è nemmeno chiaro quando saranno avviate. Il portavoce dell'OMS Tarik Jasarevic ha comunicato che all'inizio del 2019 l'agenzia non aveva ancora trovato promotori finanziari per il lavoro. In fin dei conti, Aaby teme che l'OMS stia solo cercando di salvare le apparenze. Sospetta che l'agenzia desideri dare l'impressione di voler fare le verifiche adeguate dopo il suo rapporto del 2014 sugli effetti off-target, ma che l'obiettivo reale sia semplicemente far sparire la questione. Se gli effetti aspecifici sono reali e abbastanza potenti da salvare vite umane, allora le agenzie di sanità pubblica dovrebbero prendere in considerazione modifiche ai programmi vaccinali, e forse addirittura la sostituzione di alcuni vaccini inattivati con vaccini vivi, il che sarebbe estremamente complicato.

L'anno scorso ho chiesto a Frank DeStefano, direttore dell'Immunization Safety Office dei CDC, che cosa servirebbe per introdurre simili modifiche negli Stati Uniti. «Sicuramente sarebbero necessarie prove più tangibili che si tratta un effetto reale», ha risposto, facendomi inoltre notare che all'epoca l'agenzia non aveva alcun progetto di approfondire il tema. Ma anche se esistessero prove aggiuntive, ha continuato, i CDC dovrebbero prendere in considerazione tutti i possibili rischi e benefici prima di modificare le politiche.

La sera in cui ho lasciato la Guinea-Bissau ero seduta in giardino con Benn: mangiavo formaggio danese che aveva portato dal suo ultimo viaggio in patria e riflettevo sulla filosofia scientifica della coppia. Senza dubbio, i due ricercatori non temono di esprimere le proprie convinzioni: sono certi che gli effetti aspecifici siano reali, ma talmente complessi da lasciare molti dettagli ancora nel mistero. Per i critici, la forza della loro convinzione è una grande debolezza, un preconcetto che inficia i risultati.

Sarà forse anche vero. Ma sicuramente non sono gli unici ad avere preconcetti. Gli scienziati sono persone dotate di idee, pregiudizi e sentimenti. Ogni studio prevede un certo grado di interpretazione. Come possiamo sapere quali interpretazioni si avvicinino maggiormente alla verità? Chi ammette le proprie convinzioni è forse meno imparziale di chi non lo fa? A chi spetta decidere se siano state raccolte prove a sufficienza da poter raggiungere un'intesa, soprattutto se le implicazioni sono inaspettate, sconvenienti e importanti? All'interno di questo settore piccolo e controverso, per lo meno, non esistono risposte chiare.

«È un po' come tirare un filo senza però sapere quanto è grande il gomitolo», mi ha detto Benn riferendosi alla ricerca sui vaccini, anche se la sua affermazione è applicabile al procedimento scientifico in quanto tale. La biologia è immensamente complicata perché i nostri organismi sono complessi. Anche la pratica della scienza è complicata perché è un prodotto dell'umanità, un'impresa creata e plasmata dalle nostre menti imperfette. Se i vaccini agiscono davvero come sostengono Aaby e Benn (ed è una domanda ancora aperta), sarà necessario continuare a sbrogliare la complicata matassa ancora per un bel po', prima che il resto del mondo la pensi come loro. ■

PER APPROFONDIRE

Vaccine Programmes Must Consider Their Effect on General Resistance. Aaby P. e altri, in «British Medical Journal», Vol. 344, articolo n. e3769. Pubblicato on line il 14 giugno 2012.

The Introduction of Diphtheria-Tetanus-Pertussis and Oral Polio Vaccine among Young Infants in an Urban African Community: A Natural Experiment. Wengel Mogensen S. e altri, in «EBiomedicine», Vol. 17, pp. 192-198, marzo 2017.

Trained Immunity: An Ancient Way of Remembering. Netea M.G. e Van der Meer J.W.M., in «Cell Host & Microbe», Vol. 21, n. 3, pp. 297-300, 8 marzo 2017.

BCG Vaccination Protects against Experimental Viral Infection in Humans through the Induction of Cytokines Associated with Trained Immunity. Arts R.J.W. e altri, in «Cell Host & Microbe», Vol. 23, n. 1, pp. 89-100, 10 gennaio 2018.

Straight Talk about Vaccination. Daley M.F. e Glanz J.M., in «Scientific American», settembre 2011.

ETOLOGIA

CON UN OCCHIO APERTO

Perché animali come foche e delfini hanno sviluppato la capacità di dormire con metà cervello?

di Gian Gastone Mascetti

Illustrazioni di Giulia Neri/Amaca Agency

Gian Gastone Mascetti è studioso di neurofisiologia al Dipartimento di psicologia generale dell'Università di Padova, dove è andato in pensione come professore di neurofisiologia. Le sue ricerche riguardano il sonno, e in particolare la relazione tra sonno e lateralizzazione del cervello.

Uno degli aspetti più sorprendenti degli organismi viventi, piante o animali che siano, è il modo in cui fisiologia e comportamento si sono adattati all'alternarsi di luce diurna e oscurità notturna. Un orologio nel cervello sincronizzato sui segnali ambientali genera cambiamenti biologici che variano nel corso di cicli di 24 ore: sono i ritmi circadiani (dal latino *circa* e *diem*, ovvero «circa» e «giorno» rispettivamente). In questo modo, la rotazione terrestre si riflette nelle dinamiche dei nostri circuiti neuronali.

Il ciclo sonno-veglia è il tipico esempio di ritmo circadiano. La veglia è caratterizzata da attività sensoriale e movimenti; al contrario, durante il sonno i sensi perdono contatto con l'ambiente circostante e i movimenti si affievoliscono. Questa periodica perdita di conoscenza appare sui tracciati dell'elettroencefalogramma (EEG) come una firma: onde lente e molto ampie sono tipiche del sonno profondo, la veglia invece è caratterizzata da onde rapide e ravvicinate. Il sonno però rimane in larga parte un mistero. Perché un animale dovrebbe decidere di sospendere le attività sensoriali e motorie di base per diverse ore di fila e diventare un possibile bersaglio per i predatori? La domanda è particolarmente pertinente per i mammiferi marini, che durante il sonno devono regolare respirazione e temperatura corporea.

Alcuni animali hanno risolto il problema sviluppando la capacità di dormire con metà cervello mentre l'altra metà resta vigile, un comportamento noto come sonno a onde lente in un solo emisfero (*unihemispheric slow-wave sleep*, USWS). Altri invece adottano il sonno in un solo emisfero in alcune circostanze, ma se necessario dormono con entrambi gli emisferi. I mammiferi marini, alcuni uccelli e probabilmente i rettili entrano in uno stato di semiveglia in cui a volte tengono un occhio aperto. Da poco i ricercatori hanno scoperto alcuni retaggi dell'USWS anche negli esseri umani.

Il sonno in un solo emisfero offre una prospettiva affascinante per capire i misteri del sonno. È possibile eseguire gli studi sulla parte dormiente e usare quella vigile come controllo, necessario per gli esperimenti. La capacità di crescere e svilupparsi con una relativa mancanza di sonno, come avviene nei delfini e in alcuni uccelli, può suggerire una cura per i disturbi del sonno umani, che spesso interessano un lato del cervello più dell'altro.

Svegli ma non del tutto

Lo studio del sonno in un solo emisfero è iniziato nel 1964, quando il controverso ricercatore John C. Lilly si accorse che i delfini riposavano tenendo un occhio aperto e ipotizzò che dormissero con un solo lato del cervello. Lilly ritenne che i delfini fossero in grado di ascoltare e monitorare l'ambiente circostante anche

IN BREVE

Durante il sonno, i sensi perdono contatto con l'ambiente circostante e i movimenti si affievoliscono. Questo porta a chiedersi perché gli animali dovrebbero sospendere le attività cerebrali di base per un numero indefinito di ore, diventando un facile bersaglio per i predatori.

Alcuni animali hanno risolto il problema sviluppando la capacità di dormire con metà cervello mentre l'altra resta vigile, uno stato intermedio definito sonno a onde lente in un solo emisfero.

Questo assopimento a metà offre una prospettiva affascinante per comprendere i misteri del sonno. È possibile effettuare gli studi sulla parte dormiente e usare quella vigile come controllo, necessario per gli esperimenti. Queste ricerche possono addirittura fare chiarezza su alcuni disturbi del sonno negli esseri umani.

SONNO ALTERNATO

Metà acceso, metà spento

Diverse regioni cerebrali, incluso il tronco encefalico, l'ipotalamo e il prosencefalo basale, interagiscono durante il ciclo sonno-veglia. Nei delfini, la precisa coordinazione tra l'emisfero di destra e quello di sinistra permette a un lato di dormire mentre l'altro resta vigile.
Un modello del 2012 di sonno in un solo emisfero sviluppato dall'Università di Sydney dimostra che i nuclei preottici ventrolaterali (VLPO) nell'ipotalamo di ogni emisfero scambiano messaggi tra il lato destro e quello sinistro per stabilire quale dei due deve riposare. Anche le commissure posteriori nel tronco encefalico intervengono in questo processo comunicativo.

Illustrazione di Shiz Aoki e Jerry Gu/Anatomize Studios

durante il sonno. In seguito ha condotto esperimenti per determinare che cosa avvenisse nel cervello dei cetacei.

Il sonno dei cetacei, ovvero balene, delfini e focene, continua a essere oggetto di studio. Questi animali conservano due caratteristiche fisiologiche del loro passato ancestrale sulla terraferma: polmoni per respirare aria e meccanismi per mantenere più o meno costante la temperatura corporea in acqua (termoregolazione). Apparentemente, dormire con metà cervello ha permesso loro di mantenere queste caratteristiche nell'ambiente acquatico.

Più di recente, Lev Mukhametov e colleghi dell'A.N. Severtsov Institute of Ecology and Evolution all'Accademia russa delle scienze hanno indagato più a fondo di quanto avesse fatto Lilly ciò che avviene nel cervello dei cetacei. I ricercatori hanno condotto ampi studi sul sonno dei tursiopi, una specie di delfino. Nei tracciati EEG hanno regolarmente constatato come un emisfero dell'animale entrasse in uno stato di sonno a onde lente mentre l'altro restava vigile. Raramente hanno osservato il sonno a onde lente in entrambi gli emisferi (o BSWS), e non hanno registrato alcun segno inequivocabile di sonno con movimento rapido oculare (REM) associato ai sogni.

Durante il sonno USWS, l'emisfero vigile del delfino controlla il nuoto e la riemersione per respirare. Come aveva ipotizzato Lilly dopo un'osservazione superficiale, l'occhio che resta aperto, corrispondente all'emisfero sveglio opposto, permette al delfino di monitorare la presenza di predatori e nuotare in sincronia con i compagni mentre l'altro emisfero si riposa. Nel 1999 P. Dawn Goley, del Dipartimento di scienze biologiche della Humboldt State University, ha notato, al pari di Guido Gnone e colleghi dell'Acquario di Genova nel 2001, che quando i delfini nuotavano in gruppo l'occhio aperto di un compagno restava in contatto visivo con il resto del branco. Se un membro si spostava sul lato opposto, lo schema oculare si invertiva.

I delfini devono inoltre affrontare temperature basse, che li espongono a importanti perdite di calore. Tenere sveglio un emisfero del cervello permette agli animali di mantenersi caldi muovendo pinne e coda per nuotare e riaffiorare vicino alla superficie, come hanno osservato Praneshri Pillay e Paul R. Manger quando lavoravano all'Università del Witwatersrand a Johannesburg.

Sappiamo che in generale nei cetacei e in altri animali il ciclo sonno-veglia è regolato dalle interazioni tra più strutture cerebrali, che comprendono tronco encefalico, ipotalamo e prosencefalo basale. Non sappiamo ancora che cosa regoli precisamente il sonno in un solo emisfero, ma abbiamo alcuni indizi. Nel 2012 David J. Kedziora e colleghi dell'Università di Sydney hanno elaborato un modello matematico di USWS per rappresentare gli schemi di sonno del delfino. Nel modello, le sottostrutture che si trovano nell'ipotalamo di ogni emisfero – i nuclei preottici ventrolaterali – si scambiano messaggi per distribuire il sonno tra i due emisferi. Sembra che i segnali inibitori trasmessi tra gli emisferi permettano a un lato di dormire mentre l'alto resta sveglio. Sarebbero interessate anche le strutture cerebrali profonde, come le commissure posteriori nel tronco encefalico. Le commissure posteriori sono molto grandi nei delfini e questo spinge a interrogarsi sul loro ruolo nella gestione del sonno. Il modello messo a punto dall'Università di Sydney offre ai neuroscienziati un modo per esplorare i meccanismi messi in atto dal cervello per gestire il delicato compito di assegnare il sonno a uno dei due emisferi.

Anche l'ambiente circostante sembra avere un ruolo. Dal momento che i neuroni promotori del sonno presenti nell'ipotalamo sono termosensibili, l'aumento o il calo della temperatura cerebrale induce una fluttuazione corrispondente nella loro velocità

di attivazione. Nel 1982 Mukhametov e colleghi hanno scoperto che durante il sonno USWS la temperatura nel cervello dei delfini si abbassava nell'emisfero addormentato e restava costante in quello sveglio.

Un adattamento singolare

I cetacei si sono evoluti a partire da un antenato terrestre comune con gli ippopotami e altri ungulati. Il passaggio dall'ambiente terrestre a quello acquatico è stato graduale, e può aver incluso una transizione semiacquatica che ha richiesto importanti correzioni fisiologiche e comportamentali. Ne consegue che il sonno dei cetacei rappresenta un esempio singolare di adattamento a un ambiente nuovo, testimonianza del compromesso tra la necessità di dormire e sopravvivere.

Altri animali sono scesi a patti simili. Le foche, per esempio, hanno adottato varie soluzioni evolutive a un problema molto simile, ovvero dormire e respirare in acqua e sulla terra. Alcune famiglie di foche evitano del tutto il sonno USWS. Per esempio non c'è nelle foche «vere» o senza orecchie (famiglia delle Phocidae), che include foche artiche ed elefanti marini.

I callorini (famiglia delle Otariidae) sono invece un caso diverso. Nel 2017 Oleg I. Lyamin dell'A.N. Severtsov Institute of Ecology and Evolution ha riferito che, diversamente dai delfini, che raramente hanno un sonno in entrambi gli emisferi e probabilmente non hanno mai un sonno REM, i callorini sperimentano invece più tipi di sonno, inclusi BSWS, REM e USWS, nei diversi ambienti. Sulla terraferma per esempio predomina il sonno BSWS. In acqua, il numero di ore trascorse in sonno USWS aumenta rispetto alla terra ferma. In acqua, il sonno REM si riduce o scompare.

Quando sono in acqua e in sonno a onde lente in un solo emisfero, i callorini assumono una posizione che permette loro di dormire, respirare e monitorare i predatori in avvicinamento: si sdraiano su un lato con una pinna in acqua in costante movimento e le restanti tre fuori dall'acqua per non disperdere calore. Le narici restano fuori dall'acqua per respirare. L'emisfero cerebrale opposto a quello della pinna in movimento (e all'occhio aperto) è sveglio, per permettere all'animale di monitorare i comandi motori della pinna e mantenere la stabilità posturale. Sulla terraferma, il sonno USWS permette invece ai callorini di stare in guardia e coordinare le attività con i compagni ma non controlla respiro, temperatura corporea e movimenti.

Anche alcuni uccelli mostrano un sonno in un solo emisfero per bilanciare l'esigenza di riposo con la vigilanza difensiva. Per inciso, a volte il sonno USWS si associa al sonno BSWS e al sonno REM. Nel 1996, mentre lavorava all'Università Nicolaus Copernicus, in Polonia, Jadwiga Szymczak ha registrato la presenza di tracciati EEG a onde lente in un emisfero del merlo. Lo stesso hanno fatto nel 2001 con i piccioni Niels C. Rattenborg, all'epoca al Dipartimento di scienze della vita dell'Indiana State University, e colleghi. Due anni prima Rattenborg aveva scoperto che anche i germani reali dormono con una sola metà del cervello per controllare eventuali minacce. I germani che tenevano un occhio aperto e restavano ai margini dello stormo mostravano livelli di sonno USWS del 150 per cento più grandi rispetto agli esemplari al centro. Gli occhi aperti dei germani «sentinella» erano rivolti lontano dal gruppo. Mark A. Elgar, oggi all'Università di Melbourne, in Australia, ha scritto in uno studio del 1989 che la vigilanza diminuisce quando lo stormo si allarga e quando un animale si sposta verso il centro del gruppo.

Anche gli uccelli migratori, nei loro lunghi voli ininterrotti, sfruttano diverse strategie di sonno. Nel 2016 Rattenborg, che attualmente lavora al Max-Planck-Institut für Ornithologie a Seewiesen, in Germania, e il suo gruppo hanno studiato il sonno USWS e BSWS nelle fregate maggiori (*Fregata minor*) durante i loro dieci giorni di permanenza. In un singolo episodio di sonno USWS, un emisfero mostrava uno schema EEG di veglia controlaterale rispetto alla direzione di manovra in volo, indicando che l'occhio aperto sul lato opposto controllava dove andava lo stormo. Non solo: nel 2006, mentre lavorava alla Bowling Green State University, Thomas Fuchs ha scoperto che il tordo di Swainson compensava la perdita di sonno durante i voli notturni aumentando le ore di riposo totali con micro pisolini diurni e, quando si posava, chiudendo un occhio.

E noi?

Negli esseri umani non c'è il classico sonno USWS, ma può capitare di vivere un'esperienza simile. Masako Tamaki e il suo gruppo alla Brown University hanno registrato i tracciati EEG di persone che dormivano in un ambiente nuovo. In una pubblicazione del 2016 di Tamaki, i tracciati mostravano onde lente tipiche del sonno profondo nell'emisfero di destra e una debole attività a onde lente in quello di sinistra, segno di maggiore vigilanza. L'emisfero di sinistra, inoltre, si risvegliava più facilmente rispetto a quello opposto. Questa asimmetria, definita effetto prima notte, scompare nella notte successiva ma sembra preservare uno stato di allerta in un luogo sconosciuto. Si osserva qualcosa di simile nelle madri, che hanno una bassa soglia di risveglio se sentono il pianto o altri rumori che riconoscono come provenienti dai loro bambini.

Possiamo sentirci stanchi dopo la prima notte lontani da casa. Ma gli animali che dormono con un solo lato del cervello si sono adattati apparentemente bene alla loro routine. Quelli che si immergono in un sonno USWS trascorrono meno ore a dormire rispetto a quelli che hanno un sonno BSWS o REM.

Anche così, la loro capacità di nuotare, volare, mangiare o socializzare con i compagni resta invariata. I delfini trascorrono quasi due terzi del giorno svegli e il resto in sonno USWS, alternando le ore di sonno tra i due emisferi. Il recupero fisico e cerebrale non sembra comunque risentirne, nonostante l'assenza di sonno REM.

Nel 1997 Mukhametov e colleghi hanno riferito che negli studi sul sonno i delfini erano sempre in buona salute. In cattività, dove gli scienziati potevano osservare da vicino gli animali, i delfini hanno appreso e memorizzato attività complesse. Le fregate hanno ridotto nettamente le ore totali di sonno durante il volo ma hanno mantenuto un livello di attenzione elevato e prestazioni di volo efficienti durante i tragitti lunghi.

Alcuni animali sembrano aver risolto ripartendosi le ore di

Quando sono in acqua, i callorini dormono con un solo emisfero del cervello e assumono una posizione che permette loro di respirare e monitorare i predatori in avvicinamento

Sulla terraferma nei callorini predomina il sonno in entrambi gli emisferi, sebbene, sempre fuori dall'acqua, questi animali possano dormire anche con un solo emisfero per stare in guardia e coordinare le attività con i compagni ma senza poter controllare respiro, temperatura corporea e movimenti.

sonno parziale. I germani che dormono con un occhio aperto per fare da sentinelle allo stormo perdono ore di sonno ma senza conseguenze sul comportamento. Gli uccelli passano poi il ruolo a un compagno nei giorni seguenti. Il sonno in un solo emisfero continua ad affascinare i ricercatori perché mostra le diverse strategie evolutive messe a punto dagli animali per riposarsi ogni giorno.

L'interesse per il sonno USWS generato dagli esperimenti sul campo ha prodotto anche uno strumento di laboratorio per esplorare il ruolo del sonno nello sviluppo del cervello subito dopo la nascita. Nel 1999 il mio gruppo al Dipartimento di psicologia generale dell'Università di Padova ha scoperto che i pulcini di pollo domestico (*Gallus gallus*) appena nati favorivano il sonno nell'emisfero sinistro durante la prima settimana di vita. Nei primi giorni, i pulcini usavano soprattutto quell'emisfero per apprendere gli stimoli – schemi e colori – che il cervello elaborava per la prima volta: il sonno sembrava svolgere un ruolo nell'organizzare quanto appena appreso.

Nell'emisfero di destra il sonno aumentava via via che attività come l'analisi spaziale e l'elaborazione di nuovi eventi prevalevano in quel lato durante la seconda settimana. Quando abbiamo insegnato ai pulcini attività di distinzione cromatica, il sonno USWS si è concentrato sull'emisfero di sinistra (occhio destro chiuso ed emisfero di sinistra addormentato) perché era quello dominante nell'apprendimento dei colori. I pulcini usavano l'occhio sinistro per un'attività di apprendimento spaziale in cui dovevano selezionare un contenitore tra quattro in un angolo specifico della gabbia. L'attività consisteva nello scegliere il contenitore con un foro in alto, dove si trovava un premio. Quando avevano finito, il sonno USWS era preponderante nel lato destro (occhio sinistro chiuso ed emisfero di destra addormentato) per riposare il lato del cervello specializzato nell'attività svolta.

L'emisfero più attivo – sia che mostrasse sonno USWS o BSWS— trascorreva relativamente più tempo a dormire per recuperare. Nel frattempo l'occhio aperto sul lato dell'emisfero non dominante controllava che non ci fossero predatori e monitorava l'ambiente. Se si spostava un oggetto scuro sopra la gabbia durante il sonno USWS, i pulcini si svegliavano subito, emettendo segnali di pericolo. La vigilanza restava intatta ma non intaccava il sonno inteso come momento per rielaborare le intense esperienze sensoriali dei primi giorni di un volatile nel mondo.

Studiare gli animali che dormono con metà cervello può aiutarci a decifrare l'enigma del sonno, e magari anche a risolvere i nostri disturbi. A volte apnee ed eventi simili hanno effetti su un emisfero più che su un altro. Questo lavoro potrebbe rispondere alla domanda su come le specie bilanciano i benefici del riposo con la necessità di proteggersi dai predatori. Dormire con metà cervello è una soluzione brillante a questo dilemma, che permette di restare in uno stato cosciente e incosciente nello stesso momento. Le ricerche sul sonno in un solo emisfero riecheggiano nei secoli con un celebre passaggio estratto dai *Frammenti* di Eraclito: «Anche un'anima immersa nel sonno in realtà è al lavoro e aiuta a fare qualcosa per il mondo». ■

PER APPROFONDIRE

Cetacean Sleep: An Unusual Form of Mammalian Sleep. Lyamin O.I. e altri, in «Neuroscience & Biobehavioral Reviews», Vol. 32, n. 8, pp. 1451-1484, ottobre 2008.

Physiologically Based Quantitative Modeling of Unihemispheric Sleep. Kedziora D.J. e altri, in «Journal of Theoretical Biology», Vol. 314, pp. 109-119, 7 dicembre 2012.

Unihemispheric Sleep and Asymmetrical Sleep: Behavioral, Neurophysiological, and Functional Perspectives. Mascetti G.G., in «Nature and Science of Sleep», Vol. 8, pp. 221-238, 2016.

Evidence That Birds Sleep in Mid-Flight. Rattenborg N.C. e altri, in «Nature Communications», Vol. 7, articolo n. 12468, 3 agosto 2016.

Sleep in the Northern Fur Seal. Lyamin O.I. e altri, in «Current Opinion in Neurobiology», Vol. 44, pp. 144-151, giugno 2017.

Joesboy/iStock

Laura Grego è *senior scientist* del Global Security Program della Union of Concerned Scientists, e si è specializzata nella difesa da missili balistici.

David Wright è condirettore del Global Security Program, ed è esperto degli aspetti tecnici delle norme sulle armi nucleari.

SICUREZZA

SCUDO ROTTO

Un sistema di difesa statunitense contro missili nucleari fallisce spesso i test e potrebbe aumentare il rischio globale di una distruzione di massa

di Laura Grego e David Wright

Nel corso di un vertice tenutosi all'inizio di quest'anno, il leader della Corea del Nord Kim Jong-un e il presidente degli Stati Uniti Donald Trump non hanno trovato un accordo su come terminare il programma missilistico e di armamento nucleare nordcoreano. Pochi giorni dopo l'incontro alcune immagini satellitari hanno mostrato che Kim stava ricostruendo alcune strutture missilistiche della Corea del Nord. Nel 2017 il paese asiatico ha testato i suoi primi missili a lunga gittata e subito dopo è seguito un test di quella che è sembrata una potente bomba all'idrogeno. Dopo queste operazioni Trump ha detto ai cittadini degli Stati Uniti di non preoccuparsi. «Stiamo costruendo il più grande equipaggiamento militare al mondo», ha dichiarato al canale televisivo Fox News. «Abbiamo missili in grado di distruggere un missile in volo nel 97 per cento dei casi. Se i missili inviati sono due, saranno abbattuti».

IN BREVE

Per oltre dieci anni gli Stati Uniti hanno testato un sistema per intercettare missili nucleari in arrivo. Questo sistema mostra un'inaffidabilità e una vulnerabilità allarmanti.

I problemi sono dovuti alla fretta nel dispiegamento del sistema, chiamato Ground-based Midcourse Defense, e all'abbandono dei controlli di qualità standard.

Questi missili intercettori sono già stati messi in campo e hanno aumentato di molto i rischi nucleari globali, offrendo però una protezione minima.

Il presidente esprimeva grande fiducia nel sistema Ground-based Midcourse Defense (GMD), attualmente l'unica sentinella statunitense contro missili balistici intercontinentali che trasportano testate nucleari. Ma la sua fiducia era malriposta, e i fatti hanno smentito la sua dichiarazione. I dati dei test condotti dai militari mostrano che non c'è motivo di aspettarsi che gli intercettori del sistema funzionino oltre il 50 per cento circa delle volte. In alcuni casi l'uso di più intercettori contro ogni obiettivo potrebbe aumentare le probabilità, ma senza cambiare la situazione in modo sostanziale. La probabilità che un'arma nucleare attraversi le difese nel corso di un attacco con più missili è ancora pericolosamente alta. La nostra analisi di tutti i 19 test effettuati – l'ultimo dei quali a fine marzo – e diverse revisioni governative del programma mostrano un tasso di fallimento elevato e allarmante.

I problemi con questi intercettori sono riconducibili a decenni fa, agli inizi del programma, perché il Pentagono si affrettò a svilupparli, rinunciando a supervisioni e test adottati invece per la maggior parte delle armi più importanti. Inoltre, il sistema è vulnerabile a contromosse che qualsiasi paese in grado di costruire un missile a lunga gittata potrebbe adottare. Tuttavia il Pentagono si sta adoperando per espandere la flotta difettosa degli intercettori, nonostante abbia già speso più di 40 miliardi di dollari per giungere a questi risultati inaffidabili.

La corsa alle armi

Il mondo ha vissuto sotto la minaccia di missili balistici intercontinentali (Intercontinental Ballistic Missiles, ICBM) armati con testate nucleari fin dalla fine degli anni cinquanta. Due paesi dotati di armamenti nucleari, l'allora Unione Sovietica e gli Stati Uniti, cercavano in tutti i modi di dissuadere l'altro dall'impiegare quelle armi. Entrambi costruivano sempre più missili, armati con testate multiple, per sopraffare qualsiasi risposta che l'altro paese fosse stato in grado di lanciare. Questo ciclo di azione e reazione portò alla rapida crescita del potenziale di distruzione di massa.

Alla fine i leader statunitensi e sovietici riconobbero i pericoli di questo occhio per occhio, e nel 1972 firmarono il primo Trattato per la limitazione degli armamenti strategici (SALT I). Si accordarono anche sul Trattato anti-missili balistici (ABM), che limitò le difese contro i missili a lungo raggio e permise di rompere il ciclo degli sviluppi difensivi che spingeva l'avversario a migliorare la sua capacità di offesa. Questi accordi per il controllo delle armi e i succesivi funzionarono. La crescita a rotta di collo degli arsenali nucleari statunitensi e sovietici raggiunse il picco nel 1986, con più di 60.000 testate, e trent'anni di riduzione degli armamenti portarono quel numero al valore attuale, inferiore a 10.000.

Nel 1983, quando le riserve erano ancora considerevoli, il presidente Ronald Reagan – spinto dalla diffidenza nei confronti dei sovietici e dalla fiducia nelle nuove tecnologie – cercò di rilanciare la difesa antimissile e annunciò la Strategic Defense Initiative o «Guerre stellari». La sua visione era basata su tecnologie inesistenti o irrealizzabili, come laser spaziali alimentati da esplosioni nucleari, e dopo un po' i piani per il sistema vennero scartati.

Tuttavia la ricerca tecnologica su una difesa antimissile strategica è continuata con l'emergere di nuove minacce. Lo sforzo della Corea del Nord di dotarsi di armi nucleari e missili balistici, diventato evidente negli anni novanta, ha dato nuove motivazioni per difese strategiche che sfruttassero i miglioramenti nel tracciamento di missili e nella guida di intercettori. Ma limiti tecnologici, scetticismo sulla portata della minaccia e timori che il dispiegamento di queste difese avrebbe minacciato il processo di riduzione degli armamenti, ancora in corso ed efficace, hanno spinto l'amministrazione Clinton a rispettare i limiti del trattato ABM.

Poi, l'11 settembre 2001 ha cambiato tutto. Nel quadro politico successivo agli attacchi al World Trade Center di New York e all'inizio della «guerra al terrore», gli avversari della difesa antimissile hanno avuto difficoltà a opporsi a qualunque programma militare. Il Parlamento riusciva a dibattere sul controllo degli armamenti solo in modo limitato. Verso la fine del 2001, rifacendosi a una minaccia potenzialmente crescente da parte degli Stati canaglia e del terrorismo, l'amministrazione George W. Bush ha annunciato che gli Stati Uniti si sarebbero ritirati dal trattato ABM. In seguito il governo ha dichiarato che si sarebbe affrettato a sviluppare un piano per la costruzione di un sistema difensivo antimissile. L'era dei limiti negoziati alle difese missilistiche era terminata.

La minaccia in arrivo

Distruggere la testata di un ICBM non è facile. Questi missili sono lanciati a migliaia di chilometri di distanza dall'obiettivo, spinti da motori potenti in quella che è detta fase propulsiva. Nel giro di alcuni minuti raggiungono velocità di circa 25.000 chilometri all'ora, e quel punto possono rilasciare testate che descrivono una traiettoria ad arco nel vuoto dello spazio. Dopo mezz'ora di volo intermedio i missili rientrano in atmosfera e scendono sull'obiettivo nella fase terminale del volo, che dura solo pochi minuti.

Gli sforzi difensivi si sono concentrati sulla fase di volo intermedia perché dura molto più a lungo della fase propulsiva e perché se il sistema intercetta a grande distanza dai bersagli, difende aree molto più vaste rispetto alla fase finale. I primi intercettori trasportavano armi nucleari per far esplodere la testata in arrivo. Ma verso la fine degli anni settanta iniziò lo sviluppo di prototipi di intercettori in grado di trasportare un *kill vehicle* non esplosivo. I sensori di bordo avrebbero guidato il veicolo verso la testata in arrivo durante il suo volo intermedio. Alla velocità di collisione di 10 chilometri al secondo, l'energia cinetica per unità di massa supera di oltre dieci volte l'energia rilasciata da una quantità simi-

Il difficile passato della difesa antimissile

Gli Stati Uniti hanno difficoltà nel rendere efficaci intercettori di missili a lungo raggio, incluso il sistema Ground-based Midcourse Defense, e i tentativi diplomatici sono stati spesso sminuiti.

23 marzo 1983

Il presidente Ronald Reagan annuncia che gli Stati Uniti inizieranno un esteso programma di ricerca e sviluppo sulla difesa antimissile, chiamato Strategic Defense Initiative o SDI.

1980

1990

Maggio 1972

Stati Uniti e Unione Sovietica firmano il Trattato anti-missili balistici (ABM), ponendo un limite alle tecnologie difensive.

29 gennaio 1991

Al posto dell'SDI, il presidente George H.W. Bush annuncia il sistema Global Protection Against Limited Strikes (GPALS) per reagire ad attacchi non autorizzati, accidentali o limitati.

Test del sistema Ground-based Midcourse Defense (GMD)

◆ Successo ◆ Fallimento

31 luglio 1991

I presidenti Bush e Mikhail Gorbachev per l'ex Unione Sovietica firmano START I, riducendo gli arsenali a 6000 testate schierate per parte.

le di esplosivo ad alto potenziale, così gli impatti possono distruggere le testate con un colpo diretto ed evitare detonazioni nucleari difensive. Questo metodo «colpisci per uccidere» richiede una tecnologia sofisticata. I kill vehicle devono essere diretti su un punto preciso della testata in arrivo entro un margine di qualche centimetro.

Il piano di Bush era mettere rapidamente in campo un sistema e poi migliorarlo. Nel settembre 2004 l'Amministrazione aveva dichiarato che il sistema aveva raggiunto una «opzione di dispiegamento limitato», cioè poteva essere attivato e usato se necessario. Il giorno dell'annuncio erano disponibili solo cinque intercettori.

Oggi il GMD dispone di sensori spaziali, radar terrestri, 44 intercettori dislocati in Alaska e in California e strutture e personale per il controllo delle operazioni. Attualmente il piano del Department of Defense è aumentare il numero di intercettori a 64 entro il 2023 e possibilmente aggiungerne altri subito dopo, arrivando così a un totale di 100.

Buchi nella difesa

La pressione per il dispiegamento del sistema, però, ha causato serie limitazioni, e il GMD non ha ancora dato prova della sua utilità dal punto di vista militare. Le radici dei problemi affondano nelle scorciatoie prese dal governo per far avanzare il programma e nella complessità tecnica della difesa antimissile.

Nel 2002 il Department of Defense di Bush aveva esentato il programma dalle norme di supervisione tipicamente adottate dal Pentagono, e pensate per assicurare che i principali sistemi difensivi e l'equipaggiamento funzionino bene prima che gli Stati Uniti si trovino a dipendere da loro. Seguendo queste norme, il sistema GMD dovrebbe soddisfare criteri di maturità ed efficacia tecnica ed essere sottoposto a test operativi severi per garantirne il funzionamento desiderato in condizioni reali prima di essere disposto in campo. Ma l'esenzione di Bush aveva implicato che i prototipi di intercettori usati in ricerca e sviluppo – per definizione non pensati per il mondo reale – potevano essere impiegati in situazioni urgenti. Sebbene sia più rapido, questo approccio permette l'uso di equipaggiamento inaffidabile o poco testato.

Secondo revisioni del Department of Defense e del Parlamento, nel 2014 – dieci anni dopo l'annuncio sul dispiegamento limitato – tutti gli intercettori GMD sul campo erano stati messi in posizione prima che il Pentagono avesse effettuato un singolo test positivo di intercettamento. Idealmente, un rigoroso processo ingegneristico identifica i problemi nelle fasi iniziali, permettendone la risoluzione prima del dispiegamento. Ma nel caso del GMD i fallimenti dei test di intercettamento hanno rivelato difetti di progettazione che hanno richiesto costosi interventi su dozzine di intercettori già nei silos. Poiché gli intercettori sono stati schierati nella fase di test, componenti e progettazioni di *hardware* e di *software* differiscono da intercettore a intercettore, rendendo difficile usare la prestazione di uno per prevedere quella di un altro o risolvere problemi di interesse dell'intera flotta.

Gli intercettori hanno distrutto gli obiettivi in poco più della metà dei 19 test effettuati. Il risultato non sta migliorando nel tempo. Sei degli 11 test condotti dal 2004 hanno fallito la distruzione dell'obiettivo. Dei sei test più recenti, tre hanno fallito.

Secondo la Missile Defense Agency, l'ufficio del Pentagono che gestisce il programma, alcuni di questi fallimenti sono stati attribuiti a mancanze nei controlli di qualità. Nel 2007 l'agenzia ha affermato che procedure scadenti di produzione e di preparazione dei suoi appaltatori – attribuite allo snellimento del processo di acquisto e a pressioni nella programmazione – hanno causato «fallimenti nei test e rallentamenti nella produzione.» Un test di intercettamento da 236 milioni di dollari risultato negativo nel gennaio del 2010 è stato attribuito in parte a un piccolo dispositivo chiamato *lockwire*, che Raytheon, l'appaltatore incaricato della costruzione dei kill vehicle, non aveva installato. In seguito a quell'errore, un rapporto dell'ispettore generale del Department of Defense ha riscontrato molti altri gravi problemi di gestione della qualità.

I problemi dei controlli di qualità possono rallentare lo sviluppo mascherando altre imperfezioni che i test dovrebbero invece

Penelope Breese/Getty Images

31 agosto 1998
La Corea del Nord lancia un missile Taepodong-1 sul Giappone, ma la terza fase non riesce a portarne in orbita il carico utile.

24 maggio 2002
I presidenti George W. Bush e Vladimir Putin per la Russia firmano il trattato Strategic Offensive Reductions (SORT), limitando le due parti a schierare tra 1700 e 2200 testate ciascuna.

13 giugno 2002
Gli Stati Uniti si ritirano ufficialmente dal trattato ABM.

Dicembre 2016
Il Parlamento degli Stati Uniti abbandona il linguaggio adottato nel Missile Defense Act del 1999; elimina la parola «limitato» dal mandato di difesa antimissile.

2000

2010

3 gennaio 1993
I presidenti Bush e Boris Eltsin per la Russia firmano START II, riducendo le testate schierate tra 3000 e 3500 per parte

2 ottobre 1999
Primo test positivo d'intercettamento con un prototipo di kill vehicle di GMD.

22 luglio 2004
Primo intercettore GMD installato in un silo a Fort Greely, in Alaska.

30 settembre 2004
Il governo degli Stati Uniti dichiara che il sistema GMD è disponibile per uno schieramento limitato.

4 luglio 2017
Primo test di un missile nordcoreano con raggio apparentemente intercontinentale.

*L'intercettore non è riuscito a distruggere l'obiettivo, ma la Missile Defense Agency riporta il test come positivo.

individuare. Per esempio, il test eseguito nel gennaio 2010 è stato ripetuto nel corso dello stesso anno ed è fallito di nuovo. Ma in quell'occasione il problema è stato attribuito a un difetto di progettazione: vibrazioni dovute ai motori del razzo che il kill vehicle usa per cambiare direzione potrebbero generare errori nel sistema di guida. Il problema avrebbe potuto essere identificato prima se il lockwire mancante non avesse deviato l'attenzione del test precedente. L'identificazione del problema principale e la riparazione degli intercettori già stati schierati sono costati quasi 2 miliardi di dollari.

Un altro aspetto preoccupante dell'alto tasso di insuccesso è che si è verificato nel corso di test assai semplificati, che non riproducono le situazioni in cui un intercettore dovrebbe affrontare un nemico reale. Per esempio, nessun test ha considerato il caso di un missile in arrivo che usasse contromisure come esche realistiche. Le armi in arrivo possono trasportare molte esche simili a testate; il GMD deve individuare la testata vera tra quelle finte. Ma i test hanno usato esche molto diverse dalle false testate usate realmente, rendendo il lavoro degli intercettori semplice.

«Se non siamo in grado di distinguere gli oggetti che davvero portano una minaccia, non ha importanza quanti intercettori abbiamo. Non saremmo in grado di colpire ciò che andrebbe colpito», ha dichiarato Michael Gilmore, allora direttore dell'Operational Test and Evaluation per il Pentagono, al Parlamento nel 2013.

I risultati insoddisfacenti del GMD stridono con i ripetuti proclami di militari e funzionari politici, che nel corso degli anni ne hanno dato stime impropriamente ottimistiche. Per esempio, in una deposizione al Parlamento nell'aprile 2016 l'Ammiraglio Bill Gortney, allora comandante del North American Aerospace Defense Command e dello U.S. Northern Command, ha detto: «Siamo pronti all'azione e a proteggere Hawaii, Alaska e tutti gli altri Stati con il sistema attuale e siamo molto fiduciosi nel suo successo». In realtà il sistema non ha mostrato le sue potenzialità in condizioni reali. Il test più recente, a marzo, è stato il primo descritto dal Pentagono come operativo e non di sviluppo. L'agenzia ha dichiarato che gli intercettori (ne sono stati lanciati due) hanno distrutto il bersaglio, ma non ha dato informazioni sufficienti a permettere una valutazione indipendente delle condizioni di test.

Deterrente inefficace

Anche quando riconoscono i limiti del sistema GMD, alcuni sostengono che un qualsiasi livello di funzionalità sia meglio di niente. Questo ragionamento, però, ha gravi difetti.

La *Missile Defence Review* del 2019 afferma che un sistema di difesa antimissile come GMD aiuta a disincentivare un attacco missilistico aumentando l'incertezza nell'avversario. Per esempio, l'aggressore potrebbe dubitare della sua capacità di distruggere una frazione delle forze statunitensi sufficiente a evitare una ritorsione. Ma questi dubbi sono già presenti: una ritorsione da parte degli Stati Uniti è assicurata dalle forze nucleari nascoste in maniera sicura nei sottomarini in navigazione. E questa logica di sicuro non regge per avversari la cui intenzione non è colpire in primo luogo la capacità di risposta degli Stati Uniti, come la Corea del Nord e perfino la Cina. Gli arsenali missilistici di quelle nazioni sono troppo piccoli e imprecisi per sferrare un colpo efficace contro le forze nucleari statunitensi. Al contrario, mirerebbero a città o altre grandi aree non protette. Di conseguenza è improbabile che una difesa antimissile possa aggiungere qualcosa al deterrente attualmente garantito dalle forze statunitensi.

La *Missile Defence Review* sostiene inoltre che gli Stati Uniti abbiano bisogno di uno scudo difensivo in modo che le minacce missilistiche di un nemico non costringano il paese a desistere da azioni militari nel suo interesse o per conto di un alleato. Ma per mettere i politici degli Stati Uniti nella situazione di poter ignorare minacce nemiche un sistema come il GMD deve dar prova di alta efficacia, cosa che non ha fatto.

Nella sua essenza, la difesa antimissile è pensata per sconfiggere un attacco nucleare se i deterrenti dovessero fallire. Sebbene que-

David Ake Getty/Images (*George H. W. Bush e Boris Yeltsin*); Konstantin Zavrazhin/Getty Images (*George W. Bush e Vladimir Putin*); U.S. Missile Defense Agency (*intercettore*); Getty Images (*Kim Jong-un*)

sto sia il punto più convincente della posizione «qualcosa è meglio di nulla», in qualunque scenario realistico la difesa antimissile potrebbe fare poco. Anche se la capacità del sistema di affrontare sfide reali come le contromisure venisse migliorata, un attacco nucleare continuerebbe a presentare rischi enormi. Per esempio, se il sistema raggiungesse un improbabile 95 per cento di efficacia contro un missile, un attacco con solo cinque missili c'è sempre una probabilità su quattro che almeno una testata riesca a penetrare la difesa. La probabilità che una città sia distrutta sarebbe più grande di una previsione corretta sul lancio di un dado. L'efficacia contro un vero attacco è probabilmente molto più bassa.

In realtà le difese missilistiche potrebbero ostacolare la riduzione della minaccia nucleare affrontata dagli Stati Uniti, se non addirittura aumentarla. Finché nazioni come Russia o Cina continueranno a basarsi su arsenali strategici per la deterrenza, spingere per difese percepite come una minaccia per quel deterrente – o che aprano la strada a un sistema che lo minacci in futuro – nel migliore dei casi potrebbe limitare la riduzione nucleare. Nel peggiore, questi sforzi porterebbero allo sviluppo di armi ancora più aggressive e progettate per sopraffare la difesa, e ridurrebbero la stabilità aumentando l'incentivo a lanciare missili per primi in una crisi.

Ci sono sempre più prove che le potenze mondiali stiano tornando alla politica del rischio calcolato che il trattato ABM ha cercato di placare. Come parte del processo di ratifica del nuovo trattato per il controllo delle armi START del 2011 siglato con gli Stati Uniti, la Russia ha stabilito che ulteriori tagli al suo arsenale richiederebbero limitazioni delle difese strategiche. Di recente il presidente Vladimir Putin ha annunciato che la Russia sta sviluppando nuovi sistemi strategici di lancio nucleare, progettati per sconfiggere o eludere i sistemi di difesa antimissile statunitensi. I sistemi russi includono un'arma supersonica potenzialmente nucleare che potrebbe volare senza essere rilevata dai sensori attuali e un drone sottomarino che potrebbe trasportare armi nucleari per distruggere città costiere degli Stati Uniti.

La tendenza ad anticipare i pericoli in modo cieco e in fretta porterà a un mondo pieno di minacce ancora più grandi

Di recente la Cina ha aggiunto testate nucleari ai suoi grandi missili balistici. Nel suo rapporto al Parlamento sulla potenza militare cinese il Department of Defense ha attribuito in parte questo cambiamento alle preoccupazioni relative agli sviluppi delle difese strategiche degli Stati Uniti.

Al di là della possibilità che la difesa antimissile aumenti le minacce nucleari è concretamente possibile che un falso senso di sicurezza distorca i processi decisionali. Un'errata comprensione della capacità del sistema e la convinzione che la difesa antimissile sia altamente efficiente o anche solo parzialmente efficace potrebbero spingere i leader degli Stati Uniti ad assumere rischi maggiori in politica estera. Una fiducia infondata nella difesa antimissile riduce le motivazioni per cercare soluzioni politiche ai problemi di sicurezza nazionale e per migliorare il controllo delle armi nucleari. I missili nucleari sono un problema politico che la tecnologia non può risolvere.

Rischi aumentati

Sebbene la scala modesta dell'attuale sistema GMD ne limiti in qualche maniera il potenziale destabilizzante, i sostenitori della difesa missilistica stanno facendo pressione per espandere altre capacità. Aegis, il sistema difensivo missilistico della Marina statunitense integrato su unità navali, è stato sviluppato per difendersi da missili a corto e medio raggio in determinate regioni, ma il Parlamento ha richiesto di testare un nuovo intercettore Aegis contro un missile intercontinentale, dimostrandone quindi il potenziale come difesa missilistica strategica. Piani attuali prevedono lo schieramento su navi di centinaia di questi nuovi intercettori nel corso dei prossimi vent'anni per stabilire una capacità difensiva missilistica estesa, mobile e strategica che potrebbe essere schierata in tutto mondo. Un sistema del genere sarà fonte di preoccupazioni per Russia e Cina, e il trattato ABM era stato pensato proprio per fermare sistemi di questo tipo.

Il budget attuale destinato alla difesa richiede anche fondi per iniziare a sviluppare un sistema difensivo missilistico spaziale per intercettare missili a lungo raggio subito dopo il lancio, durante la fase propulsiva e prima che possano dispiegare contromisure. Tuttavia, questi sistemi spaziali sarebbero estremamente costosi e vulnerabili ad attacchi, rivelandosi quindi inefficaci; in più sarebbero altamente destabilizzanti.

Come per la decisione di procedere con il programma GMD, anche questa espansione della difesa missilistica sta avvenendo con discussioni assai limitate e senza una stima adeguata di costi e benefici. Il prezzo è alto. Secondo un rapporto del 2018 stilato dal Government Accountability Office degli Stati Uniti, il costo totale del sistema GMD raggiungerà almeno i 67 miliardi di dollari nel caso in cui il Pentagono schierasse 64 intercettori. Una capacità «austera» di intercettazione nello spazio richiederebbe 650 satelliti e costi superiori ai 300 miliardi, sostiene un rapporto del National Research Council del 2012. Risorse reali spese in difese illusorie.

Ma c'è un costo ancora più importante: la sicurezza nazionale. I piani attuali per la difesa antimissile degli Stati Uniti sono guidati principalmente da tecnologia, politica e paura. Come nel passato, tutto questo sta accadendo con una comprensione e considerazione insufficienti riguardo alla protezione limitata offerta realisticamente da questi sistemi. Le difese antimissile non ci permetteranno di eludere la nostra vulnerabilità alle armi nucleari. Al contrario, schieramenti su grande scala creeranno barriere per passi concreti verso una riduzione dei rischi nucleari, bloccando ulteriori tagli agli arsenali nucleari e stimolando potenzialmente nuovi schieramenti. Questa tendenza ad anticipare i pericoli di fretta e in modo miope porterà a un mondo pieno di minacce ancora più grandi. ■

PER APPROFONDIRE

2015 Assessment of the Ballistic Missile Defense System (BMDS). Director, Operational Test and Evaluation, Department of Defense, aprile 2016. **https://apps.dtic.mil/dtic/tr/fulltext/u2/1011964.pdf.**

Shielded from Oversight: The Disastrous US Approach to Strategic Missile Defense. Grego L. e altri, Union of Concerned Scientists, luglio 2016. **www.ucsusa.org/nuclear-weapons/us-missile-defense/shielded-from-oversight.**

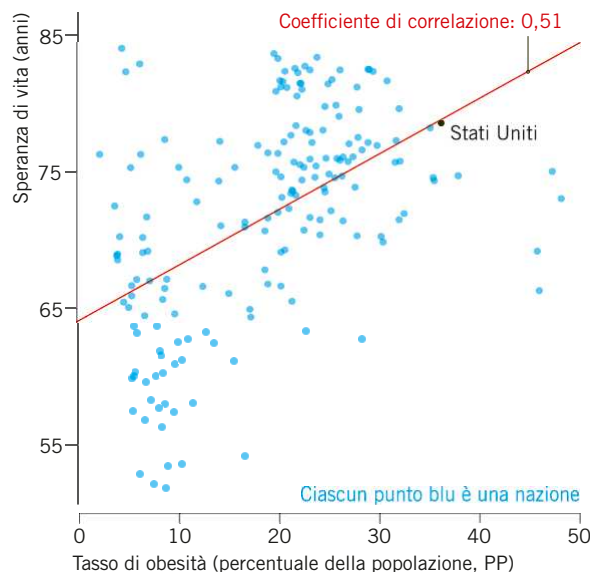
The Warfighter and Decision Makers Would Benefit from Better Communication about the System's Capabilities and Limitations. U.S. Government Accountability Office, 30 maggio 2018. **www.gao.gov/products/GAO-18-324.**

La dinamica della corsa agli armamenti. Rathjens G.W., in «Le Scienze» n. 10, aprile 1969.

Interpretare in modo sbagliato grafici in cui sono visualizzati dei dati può rafforzare pregiudizi sulla realtà

L'obesità allunga la vita?

«Un'immagine vale più di mille parole». Questo adagio ci porta a credere che possiamo interpretare rapidamente un grafico in modo corretto. Ma i grafici sono ragionamenti visivi, e possono essere facilmente fraintesi se non facciamo molta attenzione. Alberto Cairo, Knight Chair in *visual journalism* all'Università di Miami, mostra i tranelli in un esempio. Imparare come leggere meglio un grafico può essere di aiuto per orientarci meglio in un mondo in cui la verità potrebbe essere nascosta o distorta.

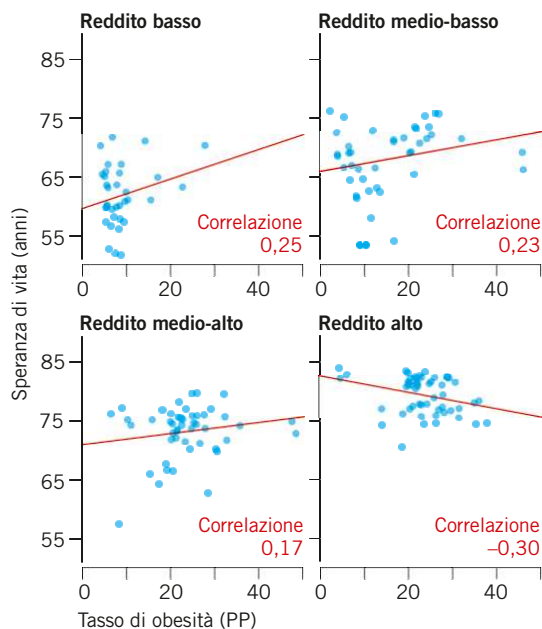
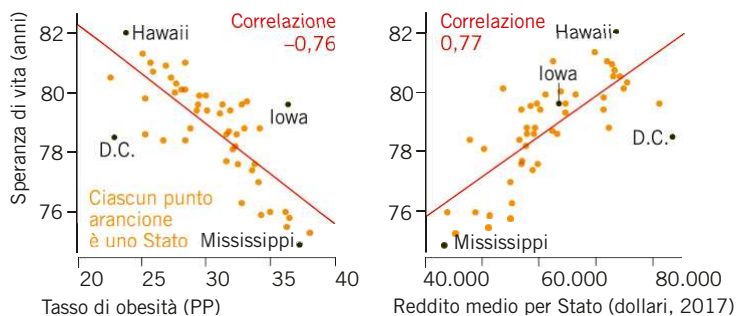
Dite che siete obesi, e familiari, amici e il vostro dottore vi ripeteranno fino alla noia che l'obesità potrebbe aumentare il rischio per diabete, malattie del cuore, addirittura i tumori. Tutte condizioni che vi accorcerebbero la vita. Un giorno però vedete questo grafico (*destra*), e subito vi sentite meglio perché mostra che, in generale, più è obesa la popolazione di una nazione (*a destra, nel grafico*), più alta è la speranza di vita nella stessa nazione (*in alto, nel grafico*). Quindi, le persone obese devono vivere più a lungo, pensate. Dopo tutto, la correlazione (*linea rossa*) è molto forte. Di per sé il grafico non è sbagliato. Ma non mostra realmente che le persone più sono obese, più a lungo vivono. Una descrizione più approfondita sarebbe: «A livello nazionale, paese per paese, c'è un'associazione positiva tra tassi di obesità e speranza di vita alla nascita, e viceversa». Ma questo non significa che un'associazione positiva resterà valida a livello locale o individuale, o che c'è un collegamento causale. Ci sono due errori.

Primo, un andamento in dati aggregati può scomparire o addirittura invertirsi una volta che si esaminano i numeri a differenti livelli di dettaglio. Se i paesi sono suddivisi in base al livelli dei redditi, la forte correlazione positiva diventa più molto più debole con l'aumentare del reddito. Nella nazioni con i livelli di reddito più elevati (*grafico in basso a destra*), la correlazione è negativa (tassi di obesità più elevati significano speranza di vita più bassa).

Reddito basso — Correlazione 0,25

Reddito medio-basso — Correlazione 0,23

Reddito medio-alto — Correlazione 0,17

Reddito alto — Correlazione –0,30

Speranza di vita (anni) — Tasso di obesità (PP)

L'andamento rimane negativo quando si guarda agli Stati Uniti, Stato per Stato: la speranza di vita alla nascita crolla con l'aumento dell'obesità (*sinistra*). Ma questo nasconde il secondo errore: l'associazione negativa può essere influenzata da altri fattori. Esercizio fisico e accesso ai servizi sanitari, per esempio, sono associati con la speranza di vita. Come anche il reddito (*destra*). L'errore è determinare qualcosa sul vostro rischio individuale guardando a dati aggregati che non riflettono circostanze individuali. Se invece guardate ai dati dei singoli in un ampio campione di persone selezionate a caso, potreste scoprire che l'obesità potrebbe essere, o meno, collegata con la speranza di vita per qualcuno nella vostra situazione.

Che cosa fare

1. Cercate di non vedere solo quello che il grafico mostra, ma quello che potrebbe non mostrare.
2. Non saltate a conclusioni, soprattutto se un grafico sembra confermare quello che già credete.
3. Domandatevi se state traducendo correttamente in parole il contenuto del grafico.
4. Considerate se i dati rappresentano o meno il livello richiesto per fare l'inferenza che volete. Per esempio, se volete sapere qualcosa riguardo a una nazione, consultate dati a livello di nazione, ma se volete sapere qualcosa sui rischi per la vostra salute, trovate dati sugli individui. E in ogni caso, ricordate sempre che, in un grafico o tra qualsiasi altro dato, la correlazione non è la stessa cosa della causalità.

Consulente: Heather Krause, Datassist; fonti: *Association Between Class III Obesity (Bmi of 40–59 Kg/M²) and Mortality: a Pooled Analysis of 20 Prospective Studies*, di Cari M. Kitahara e altri, in «PLOS Medicine», 8 luglio 2014; CIA World Factbook (*tassi globali di obesità, 2016*); Banca mondiale (*speranze di vita alla nascita e classificazione per gruppi di reddito, 2016*); CDC (*tassi di obesità per gli Stati Uniti, 2017*); *How Charts Lie: Getting Smarter About Visual Information*, di Alberto Cairo, W. W. Norton (*in stampa*); data per Wisconsin e Maine non disponibili

di Paolo Attivissimo

giornalista informatico e studioso
della disinformazione nei media

Perché il 5G fa più paura del benzene?

I timori sollevati da questa tecnologia sono legati alla sua novità non al suo livello di pericolosità

L'introduzione della tecnologia cellulare 5G ha scatenato in vari paesi una reazione di paura molto rumorosa: sono nati comitati anti-5G che chiedono moratorie ai politici e presidiano i siti previsti per le antenne, e nei *social network* prosperano messaggi e video che mettono in guardia contro i presunti pericoli mortali che correremmo tutti se dovessimo adottare questa nuova tecnologia. Gli operatori telefonici, spiazzati da questi timori, frenano i propri piani di installazione.

Una delle argomentazioni principali dei contrari al 5G è che l'Agenzia internazionale per la ricerca sul cancro (IARC) ha classificato i campi elettromagnetici non ionizzanti in radiofrequenza, come quelli emessi dalle antenne delle reti cellulari e dai telefonini, nel gruppo 2B, ossia nei carcinogeni possibili. Questa classificazione include anche i campi elettromagnetici generati dalle attuali tecnologie cellulari (3G e 4G) e dagli apparati Wi-Fi, ma la preoccupazione degli oppositori si concentra sul 5G, invocando il principio di precauzione per via dell'uso di frequenze radio differenti e di un numero elevato di microantenne.

Più antenne meno esposizione

Queste preoccupazioni non sembrano tenere conto del fatto che quelle frequenze sono già in uso in altre applicazioni e studiate da anni e che l'uso di tante antenne più piccole permette di ridurre l'esposizione media, così come una stanza può essere illuminata con meno potenza se si piazzano luci deboli nei punti giusti invece di mettere una lampadina potentissima in mezzo al soffitto.

È interessante confrontare questa situazione con quella di un altro dispositivo adoperato da un gran numero di utenti e le cui emissioni sono classificate dalla IARC nel gruppo 1, ossia fra i carcinogeni accertati oltre ogni dubbio: non possibili o probabili, ma acclarati. Questo dispositivo è molto diffuso, con circa 21.000 punti di emissione primari sparsi in tutta Italia, molti dei quali in città, a ridosso delle abitazioni; le sue emissioni penetrano nelle case e l'Organizzazione mondiale della Sanità dichiara che non esiste un livello sicuro di esposizione raccomandato. Eppure non ci sono comitati per chiederne il bando, una moratoria o almeno un contenimento delle emissioni (fattibilissimo, e già adottato da anni per esempio in Svizzera), e non ci sono proteste sui social network. Cosa ancora più interessante, quando sarà chiaro di che cosa si tratta resterete quasi sicuramente indifferenti.

Valutare i rischi

La ragione di questa indifferenza è probabilmente legata alla familiarità: le emissioni sono quelle di benzene da parte delle pompe di benzina, delle automobili e delle sigarette. Cose che usiamo o vediamo usare da sempre e che quindi non hanno alcuna connotazione di novità. Non essendo nuove, non incutono timore o sospetto. Il 5G, invece, è stato presentato come una tecnologia radicalmente nuova, con vantaggi frivoli come lo scaricamento più veloce di film, senza evidenziare invece la sua capacità di ridurre l'esposizione: una scelta comunicativa poco attenta ai gli umori odierni.

Ma c'è anche un altro fattore in gioco: l'assuefazione ai pericoli ritenuti inevitabili. Dato che per moltissimi è impossibile fare a meno di recarsi spesso al distributore di carburanti, l'esposizione al benzene che questo comporta viene accettata disinvoltamente. Anzi, se si prova a far notare la questione, spesso viene spontanea l'alzata di spalle che nega l'esistenza del pericolo. Non ci si può far nulla, quindi è inutile pensarci.

Quali che siano i pericoli reali dei campi elettromagnetici, c'è insomma un pericolo ben più grande: la scarsa capacità umana di valutare razionalmente i rischi, specialmente se tecnologici.

di Beatrice Mautino

biotecnologa, giornalista e comunicatrice scientifica. Tra i suoi libri più recenti *Il trucco c'è e si vede* (Chiarelettere, 2018)

Le meraviglie del talco

Nei cosmetici si trova quello di altissima qualità, ma questo minerale ha tantissimi usi, spesso sorprendenti

«Qui estraiamo il talco migliore del mondo», mi racconta con orgoglio Barbara Pons, coordinatore tecnico-scientifico dell'Ecomuseo delle miniere della Val Germagnasca, una valle stretta e storicamente molto povera a una settantina di chilometri da Torino.

Quando pensiamo al talco, la mente va subito alla polvere che ci mettevano dopo il bagnetto, ma a vedere numeri e destinazioni d'uso del talco si rimane stupiti. Almeno la metà dell'uso in cosmetica è destinato ai pigmenti. Ogni volta che ci trucchiamo, che indossiamo un rossetto o spalmiamo un fondotinta, stiamo usando questo minerale come base neutra per materie prime coloratissime. Inoltre, «se ne trovano fino a 25 chilogrammi in un'automobile – mi spiega Pons – nelle plastiche dei paraurti e dei cruscotti, ma anche nelle parti in gomma e nei pneumatici». Lo ingeriamo come eccipiente nei medicinali, è talco molta della polvere che ricopre le gomme da masticare e lo state accarezzando proprio ora mentre sfogliate le pagine patinate di questa rivista.

Morbido e piacevole

Geologicamente parlando, è un fillosilicato di magnesio, un minerale molto morbido, usato come valore di riferimento nella scala di Mohs che classifica i minerali progressivamente da 1, il talco, a 10, il diamante, in base alla loro durezza. Al tatto è piacevole, sembra sapone ed è sufficiente una leggera pressione con l'unghia per scalfirlo e produrre scaglie sottilissime che lo rendono un ingrediente indispensabile per l'industria. Ma c'è talco e talco, non tutto è bianco e non tutto è adatto al settore cosmetico che ha standard di qualità elevatissimi. ,

La via più classica di formazione di questo minerale è la metamorfosi dei serpentini e di altre rocce di origine vulcanica marina che portano a un talco che rischia sempre di portarsi dietro qualcosa della storia passata. Il talco della Val Germagnasca, invece, si è formato dall'incontro tra fluidi ricchi in silice e dolomie, cioè depositi organici derivanti da scheletri di organismi marini ricchi in calcio e magnesio. Questo fa sì che sia bianco e pressoché privo di contaminanti.

Un giacimento sotto il monte

«Dobbiamo immaginare il giacimento come una specie di lenzuolo che attraversa la montagna – continua la mia guida mentre il trenino che trasporta i visitatori ci conduce all'interno galleria principale – lo spessore può variare dai 20 centimetri ai 15 metri». Le prime miniere sono nate, ormai secoli fa, in alta quota, dove il lenzuolo affiorava letteralmente dalla montagna. Erano attività estrattive a conduzione familiare che, nel tempo, si sono fuse, ingrandite e dotate di sistemi innovativi di trasporto fino ad arrivare ai giorni nostri con l'acquisizione da parte di una multinazionale e l'estrazione sotto al livello del fiume dove il lenzuolo di talco sembra essere ancora particolarmente spesso.

Il trenino percorre circa un chilometro all'interno della montagna prima di arrivare al cantiere che era in uso prima della dismissione della miniera e che, oggi, è stato allestito a museo. Si ascoltano le voci dei minatori registrate poco prima che la miniera chiudesse, si sentono le esplosioni usate per scavare, si può imbracciare un perforatore e sentirne il peso, si arriva a riconoscere il talco sulla parete rocciosa e distinguerlo dal marmo che, da queste parti, è una sorta di sentinella che preannuncia la presenza del talco, ma lo si può anche toccare e vedere nelle sue diverse forme e sfumature, il tutto mentre le guide mescolano gli aspetti scientifici a quelli storici, economici e sociali di una zona di confine geografico e culturale che deve la sua salvezza all'estrazione del cosiddetto Bianco delle Alpi. Ricordatevene la prossima volta che vi truccherete.

di Dario Bressanini

chimico, divulgatore, gastronomo. Autore di *Contro natura* (Rizzoli, 2015), *La Scienza della Carne* (Gribaudo, 2016)

Lo scalogno e l'aroma del cibo cinese

Saltato nel wok in olio bollente, caratterizza in modo inconfondibile moltissime ricette

Molte cucine del mondo sono caratterizzate da aromi e sapori del tutto specifici, quei sapori che ci fanno capire subito che stai mangiando un piatto di quella cucina. Un po' come il pomodoro e il parmigiano in tanti piatti italiani.

La cucina cinese è ricca di aromi e sapori che la identificano: dall'onnipresente salsa di soia ai meno noti, da noi, funghi *shiitake*. Ma c'è una preparazione particolare usata come base in moltissimi piatti cinesi: lo scalogno fritto.

Lo scalogno probabilmente ha origine nell'Asia centrale, da cui si sarebbe diffuso da un lato verso il Mediterraneo, dove in epoca romana era già apprezzato, e dall'altro verso India e Cina, dove è diventato fondamentale nelle cucine locali. Una volta si pensava fosse una specie a parte, con il suo nome specifico (*Allium ascalonicum*) ma la classificazione botanica moderna lo considera una varietà di cipolla (*Allium cepa* var. *aggregatum*). Ha la caratteristica di formare all'interno del bulbo due o tre spicchi separati, come l'aglio, con una tunica che li ricopre tutti.

Più sapore in padella

Nella cucina cinese lo scalogno fritto, come l'aglio fritto, è ampiamente usato in qualità di condimento e insaporitore di molte preparazioni saltate in padella.

Questa tecnica millenaria consiste nello scaldare ad alta temperatura il *wok* – la tradizionale padella di metallo a fondo concavo – e aggiungere una piccola quantità di olio che viene distribuito sulla superficie. Questo impedirà che gli ingredienti aggiunti in seguito si attacchino, e li aiuterà a cuocere più uniformemente migliorandone il contatto termico. Si aggiunge lo scalogno tritato all'olio caldo e quando inizia a rilasciare l'aroma caratteristico si aggiungono gli altri ingredienti tagliati a piccoli pezzi affinché cuociano velocemente.

Lo scalogno fritto si prepara anche in anticipo da usare come condimento e persino come snack salato. È affettato e gettato in olio bollente fino a quando diventa marroncino e con l'aroma caratteristico. È poi scolato e usato in una varietà di piatti, dal riso fritto agli spaghetti saltati. L'olio di frittura, intriso degli aromi dello scalogno fritto, è filtrato e usato per aromatizzare altri piatti.

Una parte degli aromi che si sviluppano friggendo lo scalogno deriva dalle reazioni chimiche di ossidazione dei grassi di frittura. Gli acidi grassi polinsaturi, come l'acido linoleico, si degradano più velocemente di quelli saturi o monoinsaturi e portano alla formazione di composti ossigenati come il 2,4-decadienale: il più importante componente dell'aroma di cibo fritto. Una frittura in acidi saturi, più stabili, porta a un aroma più delicato.

Olio riutilizzabile

Sbucciate lo scalogno e con una mandolina tagliatelo a fette di spessore uniforme di circa 2-5 millimetri. La ricetta classica prevede l'uso di tre parti di olio, in peso, per una parte di scalogno. Usate un olio ricco di acidi grassi polinsaturi come quello di soia o di mais. Se non siete sicuri controllate l'etichetta: ormai tutti gli oli riportano la percentuale di grassi saturi, monoinsaturi e polinsaturi. Scaldate l'olio a 140 °C – 150 °C. Quando è in temperatura immergete le fette di scalogno e friggete per una decina di minuti oppure fino a quando lo scalogno si sarà dorato. Toglietelo dall'olio, scolatelo e mettetelo su della carta da cucina per assorbire l'olio in eccesso. Separate l'olio e filtratelo: lo potete riutilizzare per aromatizzare dei piatti.

Nonostante l'assenza di acqua nel prodotto finale, sia l'olio che lo scalogno fritto non si possono conservare a lungo: i grassi insaturi presenti continuano a deteriorarsi e a irrancidire formando aromi sgradevoli. Tenetelo al massimo due settimane nel frigorifero in un contenitore a tenuta.

Classificazione moderna. Identificato a lungo come specie a parte, nella classificazione botanica moderna lo scalogno è considerato una varietà di cipolla.

Food Collection/AGF

In un parco di Belgrado dominato da un'antica fortezza, i Rudi e Gaetanagnesi si sfidano a un gioco che ha in palio il cibo preferito dalla micia

Crocchette in serbo per gatta

In una nazione irta di montagne e colline come l'Italia, un fiume relativamente corto come il Po riesce a farla da padrone, sbaragliando i concorrenti dall'alto dei suoi 652 chilometri. Appena usciti dai confini nazionali, però, la concorrenza è certamente più agguerrita. Prendete la Sava, per esempio; fiume di tutto rispetto, quasi 1000 chilometri, e sorge anch'essa dalle Alpi, ma nel versante sloveno. Ebbene, al termine dei suo lungo percorso che cosa fa? Si getta in un altro fiume, il Danubio, che di chilometri sulla carta geografica ne disegna 2857. Il punto dove due fiumi così possenti si incontrano è stato considerato magico fin dall'antichità, tant'è vero che è sovrastato da una maestosa fortezza fin dal lontano 279 a.C., insomma da un tempo in cui Roma e Cartagine non avevano ancora cominciato a prendersi a legnate.

La fortezza che domina una così maestosa confluenza è vestita del verde di parchi lussureggianti, che sono oggi il cuore della grande «città bianca»: Belgrado. In un angolo di quel paradiso bucolico, abbastanza insolitamente, si ritrovano i tre esseri umani e il felino che di solito abitano queste pagine; ci si potrebbe aspettare che, vista l'incantevole e insolita *location*, i nostri potrebbero rilassarsi e rifuggire dalle solite abitudini: e invece no. Se volessimo raccontarlo per immagini, il risultato sarebbe più o meno quello che segue.

Una gatta (*mačka*). Attenta.

Un'enorme ciotola di crocchette (*krokete*). Perplesse.

Una serie di sacchetti. Oggetto dell'attenzione della gatta e motivo della perplessità delle crocchette.

«Mi dite che cosa state combinando voi tre, invece di godervi quest'aria balcanica e frizzantina?»

«Parla piano, Treccia, che distrai la micia. Stiamo giocando d'azzardo.»

«Auguri. L'assenza di un pollice opponibile è l'unica cosa che impedisce a quella gatta di mandare in rovina Las Vegas. Sono comunque contenta che questa volta non coinvolgiate me in qualcosa che contempla la teoria della probabilità», dice Alice, sdraiandosi di nuovo sul *plaid* steso sull'erba.

«Beh, diciamo che qui la teoria della probabilità funziona un po' al contrario...»

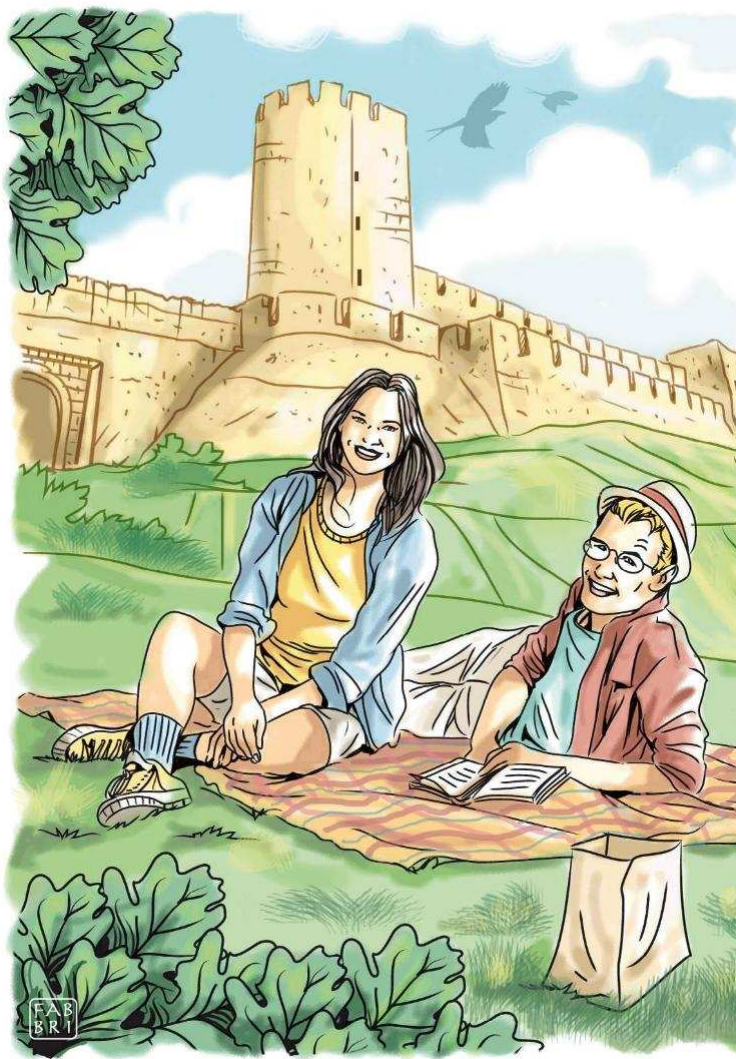
«Tanto, vince sempre lei.»

«Doc, vorresti vincere tu? E una volta diventato padrone di tutta la scorta di crocchette da viaggio, che cosa avresti intenzione di farci?»

«Ricattare la gatta, mi pare ovvio.»

«Naah... davvero avresti il coraggio di commettere un'azione così abbietta?»

«No, ma dovendo sviluppare una linea dell'assurdo basata sul fatto che io vinca... Ti risulta sia mai successo, con un gioco inventato da Rudy?»

Illustrazione di Stefano Fabbri

«Comunque, non preoccuparti, Treccia», sembra dire la voluta di fumo di pipa che si alza dalla faccia di Rudy.

«Quella che hai appena pronunciato è una delle frasi più preoccupanti al mondo, GC: lo sai vero?»

«Sì, ma Piotr non gioca. Fa il biscazziere dal cuore d'oro.»

«Uff – sbuffa Alice – fermo restando che il mio interesse è puramente teorico, potreste essere più chiari? Che so, dandomi qualche informazione sul gioco...»

«Chiedi al Capo, Treccia. Io sono troppo occupato a tener conto delle scommesse feline.»

di Rodolfo Clerico,
Piero Fabbri e
Francesca Ortenzio

La soluzione del problema esposto in queste pagine sarà pubblicata in forma breve a ottobre e in forma estesa sul nostro sito: www.lescienze.it. Potete mandare le vostre risposte all'indirizzo e-mail: rudi@lescienze.it.

IL PROBLEMA DI AGOSTO

Il problema del mese scorso riguardava delle rondini che, spaventate dalla micia, si spostano da un albero al più vicino. Essendo inizialmente ognuna su un albero, si chiedeva quale fosse il numero N di alberi/rondini per avere la certezza che su un albero si trovassero, dopo lo spostamento, almeno due rondini; e anche se esistesse un numero massimo di rondini che alla fine possono ritrovarsi sul medesimo albero.

Se N è pari, è sempre possibile avere disposizioni in cui ci si potrà ritrovare con una sola rondine per albero (per esempio con alberi disposti a coppie su una retta). Per N dispari, nel caso N = 3 gli alberi formano un triangolo scaleno: le due rondini poste sui due vertici/alberi del lato minore del triangolo si scambieranno di posto, mentre l'altra finirà inevitabilmente su uno dei due alberi già occupati. Per N > 3, sia AB la distanza minima tra due degli N alberi: le rondini di A e B si scambieranno di posto; se A è l'albero più vicino anche per qualche altro albero oltre a B, allora su A si avranno due rondini, risolvendo il problema; in caso contrario, il problema si riduce a N - 2 alberi/rondini ed è ripetibile: ma N, N - 2, N - 4 e così via. sono tutti numeri dispari, quindi nel peggiore dei casi si ritorna al caso N = 3, precedentemente risolto. In sintesi: per N pari la certezza di avere due rondini per albero non c'è mai, mentre per N dispari c'è sempre.

Il numero massimo di rondini su uno stesso albero è calcolabile considerando gli alberi disposti sui vertici di poligono regolare con un ulteriore albero al centro dello stesso (ma con le posizioni leggermente sfalsate, per soddisfare le condizioni del problema). Tracciando segmenti dai vertici al centro otteniamo N triangoli; fino al limite N = 6 (quindi una sorta di «pentagono centrato») è sempre possibile far sì che l'albero centrale sia il più vicino a ognuno degli alberi esterni, ma già con 6 triangoli (7 alberi/rondini) non è più possibile (l'angolo al centro di tutti i triangoli dovrebbe essere maggiore di 60°, quindi la loro somma maggiore dell'angolo giro). Quindi, il massimo numero di rondini che posso trovare su un albero è 5.

«È semplice, Treccia. Doc ha a disposizione un certo capitale (chiamiamolo "D") di crocchette, e lo suddivide come preferisce in un certo numero ("N", giusto per essere originali) di sacchetti indistinguibili tra di loro.»

«...e Gaetanagnesi deve indovinare quante crocchette ci sono in ogni sacchetto?»

«No, sarebbe solo un gioco di fortuna, o poco più. Anzi, la micia sa benissimo come sono suddivise le crocchette, Doc decide la distribuzione e la mette in atto di fronte a lei. Il nostro biscazziere preferito poi mescola i sacchetti, e Gaetanagnesi potrà comprarli, uno per volta, al prezzo di una crocchetta l'uno: ovviamente, se decide di acquistarne, il contenuto del sacchetto diventa di suo proprietà, e aggiunge le crocchette del sacchetto (sempre che ce ne siano: alcuni sacchetti possono essere vuoti) al suo patrimonio. Quindi decide se continuare a comprare un altro sacchetto o terminare il gioco.»

«E poi?»

«Poi si riparte, con Doc che decide una nuova distribuzione di D crocchette in N sacchetti, e la micia che studia la sua strategia, e decide se cominciare a giocare o passare subito a una nuova distribuzione. Io ho fatto un po' di calcoli, e ogni tanto ne suggerisco una particolare a Piotr, ma la curva di apprendimento di quella gatta è spaventosamente ripida: è già bravissima a capire quando il gioco le conviene e quando no.»

Piotr scuote la testa, tira un grosso respiro e annuncia: «Capo, 100 partite completate. Passo alla Fase Due?»

«"Fase Due"?», protesta Alice, indicando il grosso mucchio di crocchette davanti alla gatta. «Se la "Fase Uno" era terminare la scorta di croccantini da viaggio, la "Fase Due" che cos'è? Alzare il prodotto interno lordo della Serbia grazie al boom di vendite del cibo per gatti?»

«Nella Fase Due – Rudy opta per non raccogliere la provocazione sarcastica – Gaetanagnesi non solo conosce "D" e "N" come prima, ma è lei che decide la distribuzione delle crocchette nei sacchetti. Poi Doc mescola i sacchetti e la gatta è obbligata a iniziare il gioco, ma può smettere quando vuole.»

«E vorresti farmi credere che la micia non solo è in grado di decidere se una data distribuzione è vantaggiosa o meno, ma anche che è in grado di calcolare quale sia la distribuzione ottimale per *D* e *N* dati?»

«Beh, lo capiremo alla fine, no? Come sta andando, Doc?»

«Ehm...Capo... non so come dirtelo, ma... potresti cercare in rete un supermercato serbo specializzato in cibo per animali? Uno grosso, se possibile...»

Arrivare primi in modo scientifico

La scienza delle reti fa emergere le dinamiche del successo sociale

La formula
di Albert-László Barabási
Einaudi, Torino, 2019, pp. 210 (euro 26,00)

Doug Prasher, un dipendente di una concessionaria Toyota a Huntsville, in Alabama, era nella sua cucina nell'ottobre 2008 quando sentì alla radio che il premio Nobel per la chimica era stato assegnato a Osamu Shimomura, Martin Chalfie e Roger Tsien. Chiamò la radio per segnalare che l'annunciatore aveva pronunciato male il nome Tsien. Perché due dei neolaureati Prasher li conosceva bene: era stato lui, 16 anni prima, a spedire a Chalfie e Tsien il gene clonato che codifica per la proteina a fluorescenza verde (GFP), destinata a diventare una star dei laboratori di biologia molecolare in tutto il mondo, nella speranza che qualcuno raccogliesse i frutti delle sue ricerche, che fino a quel momento sembravano non aver destato interesse nella comunità scientifica. Albert-László Barabási è incappato nella storia di Prasher grazie a un algoritmo, messo a punto dal suo gruppo di ricerca, per individuare gli scienziati meritevoli del Nobel. Scavando nella letteratura scientifica, l'algoritmo aveva dato il nome di Prasher, che però non risultava affiliato in nessuna università. Perché aveva abbandonato la ricerca scientifica attiva poco dopo aver inviato ai due futuri Nobel il prodotto della sua ricerca.

Per Barabási, uno dei pionieri della scienza delle reti, la storia di Prasher è esemplificativa di una delle leggi del successo che illustra in questo libro: nel lavoro che coinvolge più persone, per attribuire il merito non contano solo le prestazioni, ma anche le percezioni sociali della comunità di riferimento. La ricerca pionieristica svolta da Prasher è finita nell'ombra, sovrastata dai lavori successivi dei colleghi premiati dal Nobel.

Ma l'indagine descritta in questo libro, una sorta di manuale fondativo della scienza del successo, non si limita ai premi più ambiti dalla comunità scientifica: dai campi da tennis ai concorsi musicali, dalle classifiche dei brani musicali più ascoltati alle giurie che valutano i vini migliori, fino alle carriere degli artisti le cui opere valgono milioni di dollari, Barabási, fisico statunitense originario della Transilvania, fa emergere cinque leggi universali, che riescono a trovare applicazione in contesti molto diversi, grazie all'analisi di enormi basi di dati e dei modelli della teoria delle reti.

Ci sono ambiti come lo sport, dove le prestazioni sono misurabili e sono il fattore determinante della scalata al successo. Ma, come accade in molti altri settori in cui le prestazioni non sono quantificabili in modo semplice, per esempio nel mondo dell'arte, sono le reti a farla da padrone. Barabási riporta il caso del pittore Jean-Michel Basquiat, instancabile tessitore di reti sociali, e del suo «gemello» artistico Al Diaz, un tipo solitario. Entrambi talentuosi, dopo aver esordito come enigmatico duo di graffitari sotto il nome di SAMO, le loro strade presero percorsi radicalmente diversi: il primo baciato da una fama planetaria, il secondo rimasto ai margini del mondo artistico. Certo, sappiamo tutti che anche le relazioni sociali contano per la fortuna di una carriera, ma l'analisi che emerge dal libro è quanto e in quali contesti pesano maggiormente le reti sociali, e qual è la dinamica che crea le superstar, analizzando per esempio come cambiano i gusti musicali dei giovanissimi con esperimenti come MusicLab o quanto contano il passaparola o le recensioni *on line* dei lettori per creare un *bestseller*.

La formula è un libro avvincente, in cui Barabási spazia da storie individuali, come quelle del Barone Rosso e del campione di golf Tiger Woods, a comunità digitali come GitHub e Wikipedia, a fenomeni come il gioco di carte *Exploding Kittens* che ha fatto il botto sulla piattaforma di *crowdfunding* Kickstarter, riuscendo a far emergere una visione unificante delle dinamiche sociali che generano l'alchimia giusta per il successo.

Marco Motta

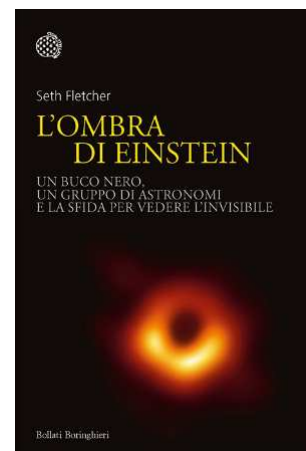
La storia della foto del secolo

Come si è arrivati all'immagine della forma di un buco nero

Appena rivelata lo scorso 10 aprile, durante un evento pubblico seguitissimo in diretta mondiale da scienziati e appassionati con il fiato sospeso, l'immagine che fa bella mostra di sé in copertina è stata immediatamente intitolata la «foto del secolo». Per una volta si può essere indulgenti con la tendenza all'esagerazione della stampa generalista, visto che si tratta della prima foto di un buco nero, in particolare di quello che si trova nella galassia M87. O, per la precisione, visto che un buco nero è per definizione non visibile, si tratta della prima immagine mai realizzata della regione che lo circonda, appena al di qua del cosiddetto orizzonte degli eventi.

La scoperta, di per sé, sarebbe sufficiente a giustificare un libro, probabilmente il primo dei tanti che usciranno su questa vicenda, ma il fiuto e la passione di Seth Fletcher danno un valore in più a questa vera e propria cronaca di una scoperta. Il giornalista statunitense, caporedattore di «Scientific American», comincia a seguire i gruppi di scienziati che si stanno preparando a tentare questa impresa fin dal 2011, in tempi, si potrebbe dire, non sospetti. Segue conferenze, incontri e lavori ai quattro angoli del pianeta, intervistando e parlando con tanti delle centinaia di ricercatori che hanno partecipato al lavoro, diventando una sorta di giornalista *embedded* con accesso privilegiato ai protagonisti.

Nel racconto si trovano tutti i dettagli scientifici che con tutta probabilità renderanno questa immagine un punto di svolta della ricerca astronomica. A cominciare dal funzionamento dell'Event Horizon Telescope, il telescopio «grande come la Terra», che ha guardato il buco nero da tanti telescopi sparsi sui cinque continenti per poi unirne i dati ed elaborarli nella foto del secolo. Ci sono i dettagli sulla straordinarietà tecnica dell'impresa che, come è stato sottolineato, equivale a puntare un obiettivo da Parigi a New York per leggere un quotidiano o mettere a fuoco dalla Terra una tazza di tè sulla Luna. Ma vi si trova anche tutto il dietro le quinte, umano e scientifico, che ha potuto raccogliere solo chi per anni ha respirato la stessa aria di questi pionieri.

Marco Boscolo

L'ombra di Einstein
di Seth Fletcher
Bollati Boringhieri, Torino, 2019, pp. 320 (euro 22,00)

Gli sconfitti della Luna

La corsa dell'Unione Sovietica al nostro satellite

La storia la scrivono i vincitori e non c'è ombra di dubbio che a vincere la corsa allo spazio siano stati gli Stati Uniti, grazie alla conquista umana della Luna, di cui quest'anno si è celebrato il cinquantesimo anniversario. Ma una corsa non si vince se si corre da soli. Si può parlare di vittoria solo quando a correre si è almeno in due, e uno arriva prima dell'altro. Ancora più soddisfazione dà la vittoria quando arriva di rimonta, quando per gran parte della corsa si è stati in svantaggio e il trionfo arriva sul filo di lana, con il sorpasso nella sfida finale.

Il libro dell'astrofisico Massimo Capaccioli, professore emerito all'Università degli Studi di Napoli «Federico II», si inserisce nell'ampia offerta di monografie dedicate alla conquista dello spazio pubblicate in occasione dei cinquant'anni della missione Apollo 11 proprio per raccontare la storia dalla parte dei vinti: l'Unione Sovietica.

L'autore parte da lontano, da Konstantin Eduardovič Ciolkovskij, oggi considerato il padre dell'astronautica, nato il 17 settembre 1857, un secolo prima di quello che sarà il primo frutto della sua eredità: il lancio dello Sputnik 1, il 4 ottobre 1957. Di ogni personaggio coinvolto nella sfida Capaccioli racconta non solo la biografia, ma ne tratteggia carattere, passioni, motivazioni, immergendoci in una storia fatta di ingegneri, scienziati, militari e politici, ma soprattutto di uomini. Un racconto in cui, in mezzo ai personaggi più noti, come Yurij Gagarin e Valentina Tereškova, emerge imponente la figura di Sergej Pavlovič Korolëv, il «progettista capo» (*glavnij konstruktor*), capace di garantire la supremazia sovietica nello spazio per quasi dieci anni per poi cederla incolpevolmente alla sua morte, avvenuta il 14 gennaio 1966, al suo omologo Wernher von Braun, scienziato tedesco al servizio degli statunitensi.

Il libro è denso di informazioni, ed è arricchito da un'importante bibliografia ragionata: una lettura obbligatoria per chi voglia conoscere la tenacia, l'ostinazione, la determinazione dell'avversario che dovettero affrontare gli Stati Uniti, e rendere a maggior ragione onore alla loro grande conquista della Luna.

Emiliano Ricci

Luna Rossa
di Massimo Capaccioli
Carocci Editore, Roma, 2019, pp. 240 (euro 18,00)

Noi e i virus, a volte complici

Il lato positivo della virologia che spesso è ignorato

I buoni e i cattivi lasciamoli ai film western: in natura nessuno è «buono», tanto meno noi. Ma siccome noi raccontiamo ogni storia dal nostro punto di vista, abbiamo deciso che i virus sono «cattivi», perché fino a poco tempo fa conoscevamo solo quelli che ci fanno ammalare. E così ce la siamo raccontata. È arrivato il momento di capire che esistono anche virus «buoni». E soprattutto di accettare, appunto, che non siamo in un western e che anche tra noi e i virus i rapporti sono dettati da una grande, e inesplorata, complessità. È il senso del libro di Guido Silvestri, virologo, professore alla Emory University di Atlanta, negli Stati Uniti, uno dei massimi esperti di HIV. Il libro aggiorna la virologia nei dettagli tecnici e nell'impostazione filosofica, attingendo alla lunga esperienza professionale dell'autore.
Il punto, spiega Silvestri, è che in un incontro tra noi e i virus la norma non è la malattia, ma la reciproca tolleranza e talvolta il reciproco vantaggio. Anche perché i virus non possono sopravvivere senza entrare nelle cellule di un ospite: che convenienza avrebbero a uccidere chi li nutre? A farcelo capire è stato un evento chiave della storia recente della scienza: la scoperta dei retrovirus come l'HIV. Cioè di virus a RNA, il cui genoma viene «retrotrascritto» in DNA e integrato nel DNA della cellula ospite, fino a diventare endogeno. Noi siamo pieni di retrovirus e i retrovirus sono pieni di noi, scrive l'autore, e un esempio clamoroso di come l'integrazione di frammenti di genoma retrovirale ci abbia dato enormi vantaggi è la placenta, costruita con proteine che si sono integrate nel genoma di un nostro progenitore più di 100 milioni di anni fa.
Soprattutto c'è la storia dell'HIV e dei suoi fratelli che colpiscono animali non umani, a volte facendoli ammalare e a volte no. Storia in cui Silvestri ha avuto un ruolo da protagonista, e che apre a una serie di domande su che cosa siano davvero i virus. E quindi, in fondo, anche sul nostro rapporto con la natura e sulla nostra identità.

Silvia Bencivelli

Il virus buono
di Guido Silvestri,
con Claudia Schmid
Rizzoli, Milano, 2019,
pp. 310 (euro 18,00)

Sbagliare è utile

Gli errori possono essere la base per nuove conoscenze

Ne abbiamo paura, l'idea di commetterne ci fa orrore, eppure, in alcuni casi, non c'è niente di meglio degli errori. Per esempio, sono utili alla scienza che procede proprio smascherando, nel corso del tempo, gli abbagli presi in precedenza. All'importanza dell'errore e al suo ruolo nel progresso della conoscenza è dedicato questo piccolo volume scritto dal giornalista scientifico e scrittore Pietro Greco. L'autore individua nel Novecento lo snodo fondamentale in cui emerge l'idea che scovare uno sbaglio non debba far paura e l'errore comincia a essere considerato un elemento fisiologico della costruzione della conoscenza, oltre che un punto di partenza. E che sia così lo dimostrano le storie dei passi falsi commessi da personaggi a cui sono legate scoperte o innovazioni fondamentali, che Greco ricostruisce. Anche Galileo Galilei, Isaac Newton o Enrico Fermi, come molti altri grandi nomi, hanno commesso errori, spesso gravi ma non meno fecondi nel momento in cui se ne è dimostrata, appunto, la fallacia.
Per dimostrare che non dobbiamo temere gli errori, l'autore dichiara espressamente, nel corso dell'esposizione, di voler correre il rischio di commetterne alcuni, scommettendo, per così dire, su alcune scelte che potrebbero non vedere tutti d'accordo. Alcune riguardano questioni squisitamente formali, come il fatto di inserire una formula matematica o una tassonomia, solitamente ritenute scoraggianti per il lettore, anche se, in questo caso, funzionali al discorso e, quindi, efficaci. In un altro caso, il rischio è relativo, invece, al contenuto. Nel parlare di Cristoforo Colombo, l'autore decide di appoggiare la ricostruzione dello storico della scienza Lucio Russo relativa alla frequentazione delle Piccole Antille e dell'America Centrale da parte dei Cartaginesi, che reputa convincente, pur sottolineando le obiezioni di altri studiosi. Le future ricerche potranno contribuire a chiarire come stiano le cose, ma lo spunto di riflessione è senz'altro interessante per chi legge.
Molto appropriata anche la domanda che chiude il libro: «O sbaglio?», che sintetizza lo spirito del discorso e fa dell'errore il punto di partenza per guardare al di là di quello che diamo per assodato.

Anna Rita Longo

Errore
di Pietro Greco
Doppiavoce Edizioni,
Napoli, 2019,
pp. 110 (euro 12,00)

Scienza e conoscenza nell'era dei dati

A Trieste Next si discute di big data e del loro impatto nella ricerca e nella società

Alla fine del secondo conflitto mondiale Vannevar Bush, direttore dell'Ufficio per la ricerca e lo sviluppo degli Stati Uniti, scrisse un celebre articolo per l'«Atlantic Monthly» in cui sottolineava che l'enorme mole di informazioni prodotte dall'umanità veniva analizzata e ricercata con gli stessi mezzi «impiegati ai tempi dei velieri».

Chissà che cosa direbbe oggi che siamo definitivamente entrati nell'era dei big data e dei supercomputer, strumenti che hanno permesso di trovare nuova conoscenza propria grazie all'analisi e a una migliore gestione dell'enorme mole di informazioni che la società digitalizzata produce.

Attorno a questi temi di grande attualità, ma di lunga gittata, fa perno l'ottava edizione della manifestazione Trieste Next, l'ultima prima del grande appuntamento dell'EuroScience Open Forum che nell'estate 2020 farà di Trieste la capitale della scienza continentale. Il titolo esteso del 2019 è «Big Data, Deep Science: il futuro della scienza e degli umani nell'era dell'intelligenza aumentata» e Trieste, nominata lo scorso gennaio centro di eccellenza internazionale per i big data, l'Internet delle cose e la statistica dall'International Telecommunication Unit (ITU), l'agenzia dell'UNESCO specializzata nelle tecnologie dell'informazione e della comunicazione, sembra la città giusta per guardare al futuro in questi settori.

Tra gli ospiti di quest'anno dell'evento triestino ci sono Federico Faggin, l'inventore, tra le altre cose, del primo microprocessore, e Peter Wadham, glaciologo britannico con alle spalle 40 spedizioni ai poli per studiare i ghiacci e le loro trasformazioni in relazione al riscaldamento globale. Il tema della capacità di tenere al passo con il presente e il prossimo futuro sarà sicuramente al centro dell'intervento di Luca Attias, dallo scorso anno Commissario straordinario per l'attuazione del digitale nella pubblica amministrazione italiana, che ha dichiarato che «oggi come oggi la civiltà di un paese si misura anche dal grado di digitalizzazione raggiunta»: quale sarà la sua ricetta per portare la pubblica amministrazione italiana nel futuro?

A fare da corona al programma principale, le attività per bambini e adulti nella centrale Piazza Unità e, ormai è una consuetudine, l'attracco al Molo Audace di una nave da ricerca oceanografica: quest'anno è il turno della nuovissima rompighiaccio *Laura Bassi*, erede della famosa *OGS Explora* dell'Istituto nazionale di oceanografia e di geofisica sperimentale.

Marco Boscolo

Anche per i più piccoli. Alcuni eventi dell'edizione 2018 di Trieste Next, manifestazione che ogni anno offre anche attività per bambini e adulti nella centrale Piazza Unità.

Marco Boventi (2, *in alto*); Matthias Lokar (2, *in basso*)

Prossimo numero

a ottobre

Le mani sull'Artico

di Mark Fischetti, Katie Peek e Kathrin Stephen

Sono iniziate le grandi manovre per il controllo dei fondali marini e lo sfruttamento e delle risorse del Grande Nord in via di rapido disgelo. Un dossier ricostruisce le crescenti tensioni geopolitiche tra i cinque paesi che si affacciano sull'Artico e i loro possibili sviluppi.

Come la materia diventa mente

di Max Bertolero e Danielle S. Bassett

Come fa il cervello a dare origine a chi siamo? La domanda ha dato vita a una nuova disciplina che usa una branca della matematica, la teoria dei grafi, per creare modelli delle connessioni cerebrali.

Il senso dei grandi acceleratori

di Andrea Capocci

Al CERN si progetta il nuovo grande acceleratore che sostituirà LHC. Ma la costruzione di macchine sempre più potenti, che vede in lizza anche singoli paesi, per studiare sempre più in dettaglio i segreti della materia, ha scatenato il dibattito tra i fisici sulla validità delle previsioni teoriche che giustificano impegni, anche finanziari, di quelle dimensioni.

Alexander Ryunin/Getty Images (*rompighiaccio*); Patrice Loiez/CERN (CMS)

LE SCIENZE S.p.A.

Sede legale: Via Cristoforo Colombo 90, 00147 ROMA.

Redazione: tel. 06 49823181
Via Cristoforo Colombo 90, 00147 Roma
e-mail: redazione@lescienze.it
www.lescienze.it

Direttore responsabile
Marco Cattaneo

Redazione
Claudia Di Giorgio (*caporedattore*), Giovanna Salvini (*caposervizio grafico*), Andrea Mattone (*grafico*), Cinzia Sgheri, Giovanni Spataro

Collaborazione redazionale
Folco Claudi, Gianbruno Guerrerio
Segreteria di redazione:
Andrea Lignani Marchesani
Progetto grafico: Giovanna Salvini

Referente per la pubblicità
A. Manzoni & C. S.p.A.
agente Daria Orsi (tel. 02 57494475, 345 4415852)
e-mail dorsi@manzoni.it

Pubblicità:
A. Manzoni & C. S.p.A.
Via Nervesa 21, 20139, Milano,
telefono: (02) 574941

Stampa
Puntoweb, Via Variante di Cancelliera, snc, 00040 Ariccia (RM).

Consiglio di amministrazione
Corrado Corradi (presidente), Michael Keith Florek (vice presidente), Gabriele Acquistapace, Markus Bossle, Stefano Mignanego

Responsabile del trattamento dati
Il responsabile del trattamento dei dati raccolti in banche dati di uso redazionale è il direttore responsabile a cui è possibile rivolgersi scrivendo a privacy@lescienze.it per i diritti previsti dal Regolamento (UE) 2016/679 sulla protezione dei dati personali.

Registrazione del Tribunale di Milano n. 48/70 del 5 febbraio 1970.

Rivista mensile, pubblicata da Le Scienze S.p.A.
Printed in Italy - agosto 2019

ISSN 2499-0590

SCIENTIFIC AMERICAN

Editor in Chief and Senior Vice President
Mariette DiChristina

President
Dean Sanderson

Executive Vice President
Michael Florek

Hanno collaborato a questo numero
Per le traduzioni: Silvia Baldi: *Vaccini reinventati*; Francesca Bernardis: *Il big bang della vita;* Federica Cuneo: *Con un occhio aperto*; Lorenzo Lilli: *Brutto tempo in vista*; Giulio Mazzolo: *Scudo rotto*; Alfredo Tutino: *Tutti i dati del mondo in un uovo.*

ABBONAMENTI E ARRETRATI
GEDI Distribuzione S.p.A.

Per informazioni sulla sottoscrizione di abbonamenti e sulla richiesta di arretrati telefonare al numero 0864.256266 o scrivere a abbonamenti@gedidistribuzione.it o arretrati@gedidistribuzione.it
Fax 02.26681986.

Italia	
abb. annuale	€ 39,00
abb. biennale	€ 75,00
abb. triennale	€ 99,00
copia arretrata	€ 9,00
Estero	
abb. annuale Europa	€ 52,00
abb annuale Resto del Mondo	€ 79,00

Accertamento diffusione stampa certificato n. 8593 del 18/12/2018

LA BOTANICA DI

LEONARDO

PER UNA
NUOVA SCIENZA
TRA ARTE
E NATURA

FIRENZE - MUSEO DI SANTA MARIA NOVELLA

13 SETTEMBRE | 15 DICEMBRE 2019

L'intreccio di fogli originali, elementi naturali e installazioni interattive, ci permette di scoprire gli studi di Leonardo da Vinci sulle strutture del mondo vegetale attraverso il suo sguardo di pensatore "sistemico".
La sua visione ci guida verso una nuova scienza basata sulle relazioni tra i diversi ambiti del sapere, dove l'uomo è sempre al centro della scena ma non come dominatore, bensì come parte di un universo armonico nella prospettiva di uno sviluppo realmente sostenibile. Rileggere Leonardo oggi, significa dunque, riportare l'attenzione sull'importanza della natura e del nostro rapporto con essa. Per il nostro futuro e per quello del pianeta in cui viviamo.

PROSSIMI APPUNTAMENTI GRATUITI A FIRENZE

13 SETTEMBRE
Conferenza di inaugurazione con i curatori
Stefano Mancuso - Fritjof Capra - Valentino Mercati

14 SETTEMBRE
Laboratori didattici e passeggiate
botaniche "leonardiane"

Tutte le informazioni su
www.labotanicadileonardo.it